

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
 федеральное государственное автономное
 образовательное учреждение высшего образования
 «Национальный исследовательский Томский политехнический университет» (ТПУ)

Школа Инженерная школа ядерных технологий
 Направление подготовки 16.04.01 Техническая физика
 Отделение школы (НОЦ) Научно-образовательный центр Б.П. Вейнберга

МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ

| Тема работы |
|--|
| ТРАВЛЕНИЕ УГЛЕРОДНЫХ ПЛЕНОК С ПОМОЩЬЮ ИНДУКТИВНО-СВЯЗАННОГО ИСТОЧНИКА ПЛАЗМЫ |

УДК 621.794.4:539.23

Студент

| Группа | ФИО | Подпись | Дата |
|--------|-------------------------|---------|------|
| ОДМ81 | Галин Ярослав Сергеевич | | |

Руководитель ВКР

| Должность | ФИО | Ученая степень, звание | Подпись | Дата |
|-------------------------------|--------------|---------------------------|---------|------|
| Доцент, НОЦ Б.П. Вейнберга | Сиделёв Д.В. | К.Т.Н. | | |

КОНСУЛЬТАНТЫ ПО РАЗДЕЛАМ:

По разделу «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»

| Должность | ФИО | Ученая степень, звание | Подпись | Дата |
|-------------|------------|---------------------------|---------|------|
| Доцент ОСГН | Кашук И.В. | К.Т.Н. | | |

По разделу «Социальная ответственность»

| Должность | ФИО | Ученая степень, звание | Подпись | Дата |
|----------------|------------|---------------------------|---------|------|
| Ассистент ООТД | Сечин А.А. | К.Т.Н. | | |

ДОПУСТИТЬ К ЗАЩИТЕ:

| Руководитель ООП | ФИО | Ученая степень, звание | Подпись | Дата |
|---|-----------------|---------------------------|---------|------|
| Заведующий кафедрой - руководитель научно-образовательного центра на правах кафедры, НОЦ Б.П. Вейнберга | Кривобоков В.П. | д.ф. – м.н., профессор | | |

Томск – 2020 г.

**Результаты обучения магистров
направления 16.04.01 «Техническая физика»
(профиль «Пучковые и плазменные технологии»)**

| Код | Результат обучения | Требования ФГОС ВО, СУОС, критериев АИОР, и/или заинтересованных сторон |
|-----------|---|--|
| P1 | Демонстрировать и использовать теоретические и практические знания фундаментальных и прикладных наук, составляющих основу современной технической физики, вскрывать физическую сущность проблем, возникающих при проектировании и реализации радиационных и плазменных технологий. | Требования ФГОС (ОПК-2, ОПК-4). СУОС ТПУ (УК 1). <i>CDIO Syllabus</i> (4.4). Критерий 5 АИОР (п. 1.1., 1.2, 1.4, 1.6), согласованный с требованиями международных стандартов EUR-ACE и FEANI. Профессиональный стандарт 40.011, 26.012 |
| P2 | Профессионально эксплуатировать современное научное и технологическое оборудование и приборы в процессе создания и реализации радиационных и плазменных технологий | Требования ФГОС (ОПК-1). СУОС ТПУ (УК 2, УК 3). <i>CDIO Syllabus</i> (2.4). Критерий 5 АИОР (п. 1.1, 1.4, 1.6), согласованный с требованиями международных стандартов EUR-ACE и FEANI. Профессиональный стандарт 40.011, 26.012, 25.035, 29.008 |
| P3 | Заниматься научно-исследовательской деятельностью в различных отраслях технической физики, связанных с современными радиационными и пучково-плазменными технологиями, критически анализировать современные проблемы, ставить задачи и разрабатывать программу исследований, выбирать адекватные методы решения задач, интерпретировать, представлять и применять полученные результаты | Требования ФГОС (ОПК-5, ОПК-7, ПК-5, ПК- 8). СУОС ТПУ (УК 1). <i>CDIO Syllabus</i> (2.4). Критерий 5 АИОР (п. 1.1, 1.4, 1.6), согласованный с требованиями международных стандартов EUR-ACE и FEANI. Профессиональный стандарт 40.011, 26.012, 25.035, 29.008 |
| P4 | Самостоятельно выполнять физико-технические научные исследования для прогнозирования результатов воздействия различных радиационных и плазменных потоков на вещество, а также оптимизации параметров радиационных и пучково-плазменных технологий, с использованием современных физико-математических методов, стандартных и специально разработанных инструментальных и программных средств. | Требования ФГОС (ОПК-6, ПК-6, 7). СУОС ТПУ (УК 6). <i>CDIO Syllabus</i> (2.1, 2.2, 2.3, 2.4), Критерий 5 АИОР (п. 1.1, 1.2, 1.3, 1.5, 1.6), согласованный с требованиями международных стандартов EUR-ACE и FEANI. Профессиональный стандарт 40.011, 26.012, 25.035 |
| P5 | Разрабатывать и оптимизировать современные пучковые и плазменные технологии с учётом экономических и экологических требований, проводить наладку и испытания технологических установок и аналитического оборудования, решать прикладные инженерно-технические и технико-экономические задачи с помощью пакетов прикладных программ. | Требования ФГОС (ПК-12,13,14). СУОС ТПУ (УК 6). <i>CDIO Syllabus</i> (4.4). Критерий 5 АИОР (п. 1.1., 1.2, 1.4, 1.6), согласованный с требованиями международных стандартов EUR-ACE и FEANI. Профессиональный стандарт 40.011, 26.012, 25.035, 29.008 |
| P6 | Участвовать в проектно-конструкторской деятельности, формулировать технические задания, составлять техническую документацию, разрабатывать и использовать средства автоматизации, анализировать варианты проектных, конструкторских и технологических решений, разрабатывать проекты и проектную документацию для создания оборудования, реализующего пучковые и плазменные технологии. | Требования ФГОС (ПК-15, 16). СУОС ТПУ (УК 2, УК3). Критерий 5 АИОР, согласованный с требованиями международных стандартов EUR-ACE и FEANI. Профессиональный стандарт 40.011 |
| P7 | Заниматься научно-педагогической деятельностью в области технической физики, участвовать в разработке программ учебных дисциплин, проводить учебные занятия, обеспечивать практическую и научно- | Требования ФГОС (ПК-9, 10, 11). СУОС ТПУ (УК 1, УК3, УК5). <i>CDIO Syllabus</i> (4.7). Критерий 5 АИОР (п. 2.4), согласованный с требованиями |

| Код | Результат обучения | Требования ФГОС ВО, СУОС, критериев АИОР, и/или заинтересованных сторон |
|------------|--|---|
| | исследовательскую работу обучающихся, применять и разрабатывать новые образовательные технологии | международных стандартов EUR-ACE и FEANI . Профессиональный стандарт 40.011, 01.004 |
| P8 | Владеть приёмами и методами работы с персоналом, находить оптимальные решения при реализации технологий и создании продукции, управлять программами освоения новой продукции и технологий. | Требования ФГОС (ОПК-3). СУОС ТПУ (УК 1, УК3). <i>CDIO Syllabus</i> (4.7). Критерий 5 (п. 2.4) АИОР, согласованный с требованиями международных стандартов EUR-ACE и FEANI. Профессиональный стандарт 40.011, 01.004 |
| P9 | Анализировать и систематизировать научно-техническую информацию, передовой отечественный и зарубежный опыт в области радиационных и пучково-плазменных технологий, внедрять новые наукоёмкие технологии, готовить документы по защите интеллектуальной собственности, разрабатывать планы и программы организации инновационной деятельности, осуществлять технико-экономическое обоснование инновационных проектов. | Требования ФГОС (ПК-5). СУОС ТПУ (УК 1, УК2). <i>CDIO Syllabus</i> (2.4). Критерий 5 АИОР (п. 1.1, 1.4, 1.6), согласованный с требованиями международных стандартов EUR-ACE и FEANI. Профессиональный стандарт 40.011, 26.012, 25.035 |
| P10 | Развивать свой интеллектуальный и общекультурный уровень, в течение всей жизни самостоятельно обучаться новым методам исследований, пополнять свои знания в области современной технической физики и смежных наук, расширять и углублять своё научное мировоззрение. | СУОС ТПУ (УК 6). Критерий 5 (п. 2.6) АИОР, согласованный с требованиями международных стандартов EUR-ACE и FEANI |
| P11 | Активно общаться в научной, производственной и социально-общественной сферах деятельности, свободно и грамотно пользоваться русским и иностранными языками как средством делового общения | Требования ФГОС (ОПК - 7). СУОС ТПУ (УК4, УК5). <i>CDIO Syllabus</i> (2.4, 3.3). Критерий 5 АИОР (п. 2.6), согласованный с требованиями международных стандартов EUR-ACE и FEANI |
| P12 | Участвовать в организации научно-исследовательских и научно-производственных работ, проявлять инициативу, брать на себя всю полноту ответственности, уметь находить творческие, нестандартные решения профессиональных и социальных задач. | Требования ФГОС (ОПК,3 ОПК-4). СУОС ТПУ (УК 3). <i>CDIO Syllabus</i> (2.1, 2.2, 2.3, 2.4). Критерий 5 АИОР (п. 1.1, 1.2, 1.3, 1.5, 1.6), согласованный с требованиями международных стандартов EUR-ACE и FEANI. Профессиональный стандарт 40.011. |

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
 федеральное государственное автономное
 образовательное учреждение высшего образования
 «Национальный исследовательский Томский политехнический университет» (ТПУ)

Школа Инженерная школа ядерных технологий
 Направление подготовки (специальность) 16.04.01 Техническая физика
 Отделение школы (НОЦ) Научно-образовательный центр Б.П. Вейнберга

УТВЕРЖДАЮ:
 Руководитель ООП

 (Подпись) (Дата) (Ф.И.О.)

ЗАДАНИЕ **на выполнение выпускной квалификационной работы**

В форме:

Магистерской диссертации

(бакалаврской работы, дипломного проекта/работы, магистерской диссертации)

Студенту:

| Группа | ФИО |
|--------|--------------|
| ОДМ81 | Галину Я. С. |

Тема работы:

Травление углеродных пленок с помощью индуктивно-связанного источника плазмы

Утверждена приказом директора (дата, номер)

52-46/с от 21.02.2020 г.

Срок сдачи студентом выполненной работы:

08.06.2020

ТЕХНИЧЕСКОЕ ЗАДАНИЕ:

Исходные данные к работе

(наименование объекта исследования или проектирования; производительность или нагрузка; режим работы (непрерывный, периодический, циклический и т. д.); вид сырья или материал изделия; требования к продукту, изделию или процессу; особые требования к особенностям функционирования (эксплуатации) объекта или изделия в плане безопасности эксплуатации, влияния на окружающую среду, энергозатратам; экономический анализ и т. д.).

Объектом исследования служит процесс травления углеродных покрытий, а предметом исследования являются параметры этого процесса.

Перечень подлежащих исследованию, проектированию и разработке вопросов

Анализ литературных источников по методам травления углеродных плёнок и способам их применения; исследование полученных

| | |
|--|---|
| <i>(аналитический обзор по литературным источникам с целью выяснения достижений мировой науки техники в рассматриваемой области; постановка задачи исследования, проектирования, конструирования; содержание процедуры исследования, проектирования, конструирования; обсуждение результатов выполненной работы; наименование дополнительных разделов, подлежащих разработке; заключение по работе).</i> | образцов до и после травления; определение оптимальных режимов травления; раздел «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»; раздел «Социальная ответственность». |
| Перечень графического материала <i>(с точным указанием обязательных чертежей)</i> | 1. Титульный лист. 2. Abstract. 3. Актуальность работы. 4. Требования к технологии. 5. Цель работы. 6. Схема эксперимента. 7. Радиочастотный генератор плазмы РПГ 128. 8. Аналитическое оборудование. 9. Результаты оптической спектроскопии. 10. Получение углеродных покрытий с помощью магнетронного распыления. 11. Параметры травления углеродных покрытий. 12. Скорость травления в зависимости от H ₂ /Ar. 13. Равномерность травления по диаметру плазменного источника. 14. Селективность травления системы углерод-титан. 15. Научное положение. 16. Оптимальные режимы травления. 17. Заключение. |
| Консультанты по разделам выпускной квалификационной работы <i>(с указанием разделов)</i> | |
| Раздел | Консультант |
| «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение» | Кашук Ирина Вадимовна |
| «Социальная ответственность» | Сечин Андрей Александрович |
| «Раздел на английском языке» | Утятин Янина Викторовна |
| Названия разделов, которые должны быть написаны на русском и иностранном языках: | |
| 1. Покрытия на основе углерода: методы их получения, применение | |
| 2. Методы травления твердого тела | |
| Дата выдачи задания на выполнение выпускной квалификационной работы по линейному графику | 21.02.2020 |

Задание выдал руководитель:

| Должность | ФИО | Ученая степень, звание | Подпись | Дата |
|-------------------------------|--------------|---------------------------|---------|------|
| доцент НОЦ Б. П. Вейнберга | Сиделёв Д.В. | к.т.н. | | |

Задание принял к исполнению студент:

| Группа | ФИО | Подпись | Дата |
|--------|-------------|---------|------|
| ОДМ81 | Галин Я. С. | | |

**ЗАДАНИЕ ДЛЯ РАЗДЕЛА
«ФИНАНСОВЫЙ МЕНЕДЖМЕНТ, РЕСУРСОЭФФЕКТИВНОСТЬ И
РЕСУРСОСБЕРЕЖЕНИЕ»**

Студенту:

| | | | |
|---------------------|--------------|---------------------------|-----------------------------|
| Группа | | ФИО | |
| ОДМ81 | | Галину Я. С. | |
| Школа | ИЯТШ | Отделение школы (НОЦ) | НОЦ Б.П. Вейнберга |
| Уровень образования | Магистратура | Направление/специальность | 16.04.01 Техническая физика |

Исходные данные к разделу «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»:

| | |
|--|---|
| 1. Стоимость ресурсов научного исследования (НИ): материально-технических, энергетических, финансовых, информационных и человеческих | Использование информации, представленной в российских и иностранных научных публикациях, аналитических материалах и изданиях, нормативно-правовых документах. |
| 2. Нормы и нормативы расходования ресурсов | |
| 3. Используемая система налогообложения, ставки налогов, отчислений, дисконтирования и кредитования | |

Перечень вопросов, подлежащих исследованию, проектированию и разработке:

| | |
|---|--|
| 1. Оценка коммерческого и инновационного потенциала НТИ | Проведение предпроектного анализа. Определение целевого рынка и проведение его сегментирования. Выполнение SWOT-анализа проекта. |
| 2. Разработка устава научно-технического проекта | Определение целей и ожиданий, требований проекта. Определение заинтересованных сторон и их ожиданий. |
| 3. Планирование процесса управления НТИ: структура и график проведения, бюджет, риски и организация закупок | Составление календарного плана проекта. Определение бюджета НТИ Составление реестра рисков проекта Диаграмма Ганта |
| 4. Определение ресурсной, финансовой, экономической эффективности | Анализ проекта с позиции ресурсоэффективности и ресурсосбережения |

Перечень графического материала (с точным указанием обязательных чертежей):

1. «Портрет» потребителя результатов НТИ
2. Оценка конкурентоспособности технических решений
3. Матрица SWOT
4. Оценка готовности проекта к коммерциализации
5. График проведения и бюджет НТИ
6. Реестр рисков проекта

| | |
|--|------------|
| Дата выдачи задания для раздела по линейному графику | 21.02.2020 |
|--|------------|

Задание выдал консультант:

| | | | | |
|-------------|------------|------------------------|---------|------|
| Должность | ФИО | Ученая степень, звание | Подпись | Дата |
| Доцент ОСГН | Кашук И.В. | К.Т.Н | | |

Задание принял к исполнению студент:

| | | | |
|--------|-------------|---------|------|
| Группа | ФИО | Подпись | Дата |
| ОДМ81 | Галин Я. С. | | |

ЗАДАНИЕ ДЛЯ РАЗДЕЛА «СОЦИАЛЬНАЯ ОТВЕТСТВЕННОСТЬ»

Студенту:

| | |
|--------|----------------------------|
| Группа | ФИО |
| ОДМ81 | Галину Ярославу Сергеевичу |

| | | | |
|---------------------|--------------|---------------------------|--------------------------------|
| Школа | ИЯТШ | Отделение (НОЦ) | НОЦ Б.П. Вейнберга |
| Уровень образования | Магистратура | Направление/специальность | 16.04.01 Техническая физика |

Тема ВКР:

| | |
|--|---|
| Травление углеродных плёнок с помощью индуктивно – связанного источника плазмы | |
| Исходные данные к разделу «Социальная ответственность»: | |
| 1. Характеристика объекта исследования (вещество, материал, прибор, алгоритм, методика, рабочая зона) и области его применения | Углеродное покрытие, травимое в аргон – водородной плазме, созданной индуктивно – связанным источником. |
| Перечень вопросов, подлежащих исследованию, проектированию и разработке: | |
| 1. Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности: – специальные (характерные при эксплуатации объекта исследования, проектируемой рабочей зоны) правовые нормы трудового законодательства; – организационные мероприятия при компоновке рабочей зоны. | – ГОСТ 12.1.029-80 Система стандартов безопасности труда; – СанПиН 2.2.4.548-96. Гигиенические требования к микроклимату производственных помещений; – СанПин 23-05-95 Естественное и искусственное освещение; – ГОСТ 12.1.002-84. Допустимые уровни напряженности и требования к проведению контроля на рабочих местах. |
| 2. Производственная безопасность: 2.1. Анализ выявленных вредных и опасных факторов 2.2. Обоснование мероприятий по снижению воздействия | – повышенный уровень шума; – электробезопасность; – пожаробезопасность; – взрывобезопасность; – гигиена труда. |
| 3. Экологическая безопасность: | – продукты реакций. |
| 4. Безопасность в чрезвычайных ситуациях: | – ситуация техногенного характера; – ситуация природного характера. |

| | |
|--|------------|
| Дата выдачи задания для раздела по линейному графику | 21.02.2020 |
|--|------------|

Задание выдал консультант:

| | | | | |
|----------------|------------|------------------------|---------|------|
| Должность | ФИО | Ученая степень, звание | Подпись | Дата |
| Ассистент ООТД | Сечин А.А. | к.т.н. | | |

Задание принял к исполнению студент:

| | | | |
|--------|-------------------------|---------|------|
| Группа | ФИО | Подпись | Дата |
| ОДМ81 | Галин Ярослав Сергеевич | | |

РЕФЕРАТ

Выпускная квалификационная работа 137 с., 69 рис., 23 табл., 36 источников, 1 приложение на английском языке.

Ключевые слова: травление, индуктивно – связанный источник, углерод, аргон – водородная среда.

Объектом исследования являются плёнки углерода.

Цель работы – получение данных о травлении углеродных покрытий в плазме индуктивно связанного источника в среде $\text{Ar}+\text{H}_2$.

В процессе исследования были получены данные о составе атмосферы рабочей камеры при травлении углерода в $\text{Ar}+\text{H}_2$ среде, выявлены рабочие диапазоны параметров травления (селективность, скорость травления), а также определены оптимальные режимы травления углерода в смеси газов Ar и H_2 .

В результате работы показано, что в смеси аргона и водорода возможно травление углеродных покрытий с высокой скоростью и селективностью по отношению к титану. Определены зависимости состава плазмы от параметров системы (мощность плазменного источника, потоки водорода и аргона). Выявлены рабочие диапазоны процесса плазмохимического травления. Селективность и скорость травления зависят от соотношения потоков аргона и водорода, давления в системе, потенциала смещения на подложке, расположения образца относительно оси плазменного источника и его мощности. Также были определены оптимальные параметры травления, которые достигаются при использовании индуктивно-связанного источника плазмы с мощностью 750 Вт, потенциале смещения на подложке -20 В, соотношении потоков водорода к аргону как 2,5:1.

Область применения: технологии повторного нанесения покрытий на восстановленные изделия.

Оглавление

| | |
|--|----|
| Введение..... | 13 |
| 1 Газоразрядная плазма как средство для травления поверхности твёрдого тела | 16 |
| 1.1 Покрyтия на основе углерода: методы их получения, применение | 16 |
| 1.2 Методы травления твёрдого тела..... | 28 |
| 1.3 Индуктивно-связанный источник для формирования газоразрядной плазмы..... | 40 |
| 1.4 Особенности травления углеродных покрытий в плазме высокочастотного разряда | 44 |
| 2 Экспериментальное оборудование..... | 47 |
| 2.1 Лабораторная установка..... | 47 |
| 2.2 Пробоподготовка образцов | 49 |
| 2.3 Индуктивно-связанный источник плазмы РПГ-128..... | 51 |
| 2.4 Оптоволоконный спектрометр AvaSpec-2048x14-USB2 | 52 |
| 2.5 Измерение толщины покрытий | 54 |
| 2.6 Оптическая эмиссионная спектроскопия тлеющего разряда GDOES .. | 56 |
| 4 Финансовый менеджмент, ресурсосбережение и ресурсоэффективность | 79 |
| 4.1 Оценка коммерческого потенциала и перспективности проведения научных исследований с позиции ресурсоэффективности и ресурсосбережения | 79 |
| 4.1.1 Потенциальные потребители результатов исследования | 79 |
| 4.1.2 Анализ конкурентных технических решений..... | 81 |
| 4.2 SWOT-анализ | 82 |
| 4.3 Планирование научно-исследовательских работ | 83 |
| 4.3.1 Структура работ в рамках научного исследования..... | 83 |
| 4.3.2 Определение трудоемкости выполнения работ..... | 84 |

| | | |
|-------|--|-----|
| 4.3.3 | Разработка графика проведения исследования | 84 |
| 4.4 | Бюджет научно-технического исследования | 88 |
| 4.4.1 | Расчет материальных затрат НТИ..... | 88 |
| 4.4.2 | Расчет затрат на специальное оборудование для научных работ..... | 88 |
| 4.5 | Основная заработная плата исполнителей темы | 89 |
| 4.5.1 | Дополнительная заработная плата исполнителей темы | 91 |
| 4.6 | Отчисления во внебюджетные фонды (страховые отчисления)..... | 91 |
| 4.7 | Накладные расходы | 92 |
| 4.8 | Формирование бюджета затрат научно-исследовательского проекта .. | 92 |
| 4.9 | Определение ресурсной (ресурсосберегающей) эффективности исследования | 93 |
| 5 | СОЦИАЛЬНАЯ ОТВЕТСТВЕННОСТЬ | 98 |
| 5.1 | Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности | 98 |
| 5.1.1 | Специальные (характерные для рабочей зоны исследователя) правовые нормы трудового законодательства..... | 98 |
| 5.1.2 | Организационные мероприятия при компоновке рабочей зоны исследователя | 100 |
| 5.2 | Производственная безопасность | 101 |
| 5.3 | Анализ опасных и вредных производственных факторов..... | 102 |
| 5.3.1 | Производственный шум | 102 |
| 5.3.2 | Промышленная санитария | 103 |
| 5.3.3 | Микроклимат..... | 103 |
| 5.3.4 | Расчёт искусственной освещенности..... | 105 |
| 5.3.5 | Электробезопасность..... | 108 |
| 5.3.6 | Пожаровзрывобезопасность | 110 |
| 5.4 | Экологическая безопасность | 112 |
| 5.5 | Безопасность в чрезвычайных ситуациях | 113 |
| | Заключение | 115 |

| | |
|--------------------------------------|-----|
| Список используемой литературы | 117 |
| Приложение А | 120 |

Введение

Углеродные покрытия обладают уникальными физико-механическими свойствами (низкий коэффициент трения, высокая износостойкость, инертность), они обладают достаточно высокой твёрдостью. Эти характеристики определяют их применение в качестве поверхностного эксплуатационного слоя для режущего инструмента, деталей пар-трения и качения, скольжения. Поэтому имеется большое количество разработанных технологических процессов по осаждению углеродных плёнок. Наиболее эффективным представляется распыление графитовых мишеней в вакууме. Здесь обычно используется два метода: с помощью магнетронной распылительной системы или с помощью дугового испарения.

Основной проблемой при нанесении таких изделий является производственный брак, который получается в результате неравномерного нанесения плёнки на подложку, например, из-за сложной геометрии изделия или частичного отслаивания плёнки с изделия в результате плохой адгезии. Помимо этого, в настоящее время важным представляется задача по нанесению покрытий на восстановленные детали (т.е. после повторной шлифовки и восстановления их поверхности). Необходима технология удаления плёнок углерода с поверхности таких деталей, причём этот метод должен быть оправдан с точки зрения материальных и физических затрат при его использовании, для этого он должен обладать высокой селективностью по углероду (~ 40), высокой скоростью травления (не менее 1 мкм/час). Под селективностью мы будем понимать соотношение скорости травления одного материала к скорости травления второго материала.

Современные технологии предполагают несколько способов удаления покрытий с поверхности твёрдых тел: жидкостное и «сухое». Для данной работы жидкостной метод не подходит так, как жидкие растворы слабо взаимодействуют с углеродом из-за его инертности к большинству химических растворов. При

«сухом» ионном травлении реализуется только физическое распыление, следовательно, может изменяться морфология поверхности образца в зависимости от его формы, что не допустимо. При ионно-химическом травлении значительный вклад имеют как физическое, так и химическое удаление вещества плёнки и поэтому это также недопустимо. При плазмохимическом травлении используется преимущественно химическое травление, а вклад физического распыления можно снизить за счет изменения потенциала смещения до минимальных значений (~ -10 В), следовательно, данный метод практически безальтернативен для рассматриваемой нами задачи [1].

Для формирования плазмы газового разряда в объёме перспективно использование индуктивно-связанного источника (ICP - inductively coupled plasma source), благодаря широкому спектру параметров, влияющих на удаление технологического слоя, таких как: мощность, вкладываемая в электрический разряд, создающий плазму; давление; скорость потока рабочего газа; температура подложки; суммарная обрабатываемая площадь; интенсивность сопутствующей ионной обработки; плотность плазмы; минимальный разброс ионов по энергиям ($\Delta e_i \leq 5$ эВ); относительно низкого рабочего давления ($10^{-2} \dots 10^{-1}$ Па)[2]. Можно подобрать оптимальный режим, при котором будут соблюдаться условия по скорости травления и селективности. Именно по этим причинам наиболее интересным и эффективным методом травления углеродных покрытий может быть плазмохимическое травление в высокочастотной (ВЧ) плазме с использованием ICP источника.

В связи с этим цель данной исследовательской работы заключается в получение данных о травлении углеродных покрытий в плазме индуктивно связанного источника в среде $\text{Ar} + \text{H}_2$.

Для достижения этого должны быть решены следующие задачи, а именно:

1) исследовать состав атмосферы рабочей камеры при плазмохимическом травлении углерода в $\text{Ar} + \text{H}_2$ среде;

2) выявить рабочие диапазоны параметров травления (селективность, скорость травления);

3) определить режимы травления углерода в смеси газов Ar и H₂.

Объект исследования – процесс травления углеродных покрытий, а **предмет исследования** – параметры процесса травления.

Научная новизна работы.

Травление углеродных покрытий с высокой селективностью по отношению к титану (>40 и более) и со скоростью травления 2 мкм/ч и выше может быть реализовано в аргон-водородной плазме, формируемой с помощью индуктивно-связанного источника плазмы в диапазоне давления 0,3-1 Па.

Практическая значимость работы.

1. Показано, что индуктивно-связанный источник плазмы будет эффективен для удаления углеродных покрытий с поверхности изделий, обеспечивая при этом постоянство её структуры и элементного состава.

2. Выявлено, что для достижения высокой селективности травления углерода по отношению к титану необходимо использовать соотношение потоков водорода к аргону не менее 2,5:1.

Научные положения, выносимые на защиту:

Плазмохимическое травление углеродных покрытий в среде аргона и водорода с селективностью по отношению к титану выше 40 и скоростью более 1,5 мкм/ч достигается при использовании индуктивно-связанного источника плазмы с мощностью 750 Вт, потенциале смещения на подложке -20 В, соотношении потоков водорода к аргону как 2,5:1.

1 Газоразрядная плазма как средство для травления поверхности твёрдого тела

1.1 Покрyтия на основе углерода: методы их получения, применение

Углерод – шестой по счёту элемент периодической таблицы. Относится к неметаллам. Расположен во втором периоде IV группы A подгруппы. Атом углерода имеет 6 электронов, 2 из которых образуют внутренний слой, а 4 – внешний. Электронная конфигурация $1s^2 2s^2 2p^2$. В возбужденном состоянии электронная конфигурация атома углерода приобретает вид, указанный на рисунке 1.1.

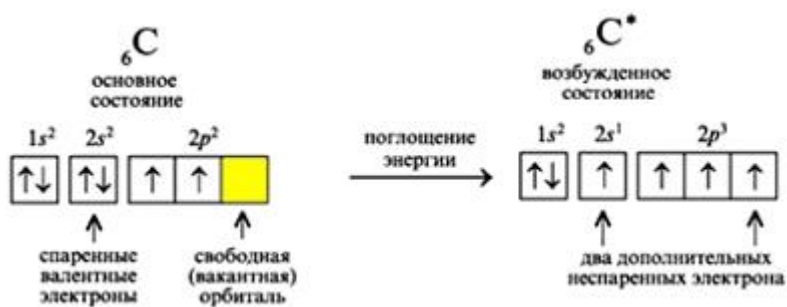


Рисунок 1.1 – Электронная конфигурация углерода при переходе в возбужденное состояние

Связи углерода с другими элементами преимущественно ковалентные. Обычная валентность углерода – IV. Отличие углерода от большинства других элементов — образование прочных (в том числе и замкнутых) связей друг с другом.

Углерод в любом гибридном состоянии способен использовать все свои валентные электроны и орбитали. У 4-валентного углерода нет не поделённых электронных пар и нет свободных орбиталей – углерод химически относительно устойчив. Характерно несколько типов гибридизации: sp , sp^2 , sp^3 . При низких температурах углерод инертен, но при нагревании его активность возрастает.

Углерод – хороший восстановитель, но соединяясь с металлами и образуя карбиды, он выступает окислителем, например:



Углеводороды представляют собой органические соединения углерода с водородом, общей формулой для них является C_xH_y , например, этан - C_2H_6 , пропан - C_3H_8 .

Образование метана – предельного углеводорода происходит в присутствии никеля (Ni), который является катализатором для данной реакции.



На данный момент известно 4 аллотропных состояния углерода, которые представляют собой: графит, алмаз, фуллерен, карбин. Кристаллическая решётка, в зависимости от модификации углерода, указывает на различные физические свойства. В графите атомы углерода находятся в состоянии sp^2 -гибридизации и расположены в параллельных слоях, образуя гексагональную решетку, которая показана на рисунке 1.2. Внутри слоя атомы связаны гораздо сильнее, чем между слоями, поэтому свойства графита сильно различаются по разным направлениям. Так, способность графита к расслаиванию связана с разрывом более слабых межслойных связей по плоскостям скольжения.

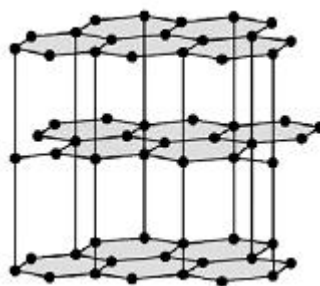


Рисунок 1.2 – Атомная кристаллическая решетка графита

Свойства графита:

- Плотность 2,08—2,23 г/см³.
- Теплопроводность графита от 100 до 354,1 Вт/(м·К).
- Коэффициент теплового расширения графита до 700 К отрицателен.

- Пределы температуры плавления — 3840—3895 °С, кипение начинается при ~ 4200 °С.
- Со многими веществами (щелочными металлами, солями) образует соединения включения.
- Реагирует при высокой температуре с кислородом, при сгорании образует CO_2 .
- В неокисляющих кислотах не растворяется.
- Относительная твердость по шкале Мооса 1.

При очень высоких давлениях и высокой температуре без доступа воздуха из графита может быть получен искусственный алмаз. В кристалле алмаза атомы углерода находятся в состоянии « sp^3 -гибридизации, и поэтому все связи эквивалентны и очень прочны. Атомы образуют непрерывный трехмерный каркас. Атомная кристаллическая решетка алмаза показана на рисунке 1.3.

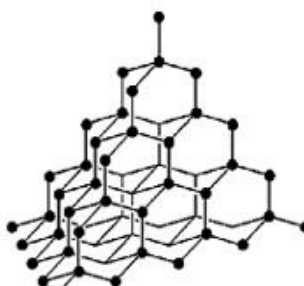


Рисунок 1.3 – Атомная кристаллическая решетка алмаза

Свойства алмаза:

- Плотность 3,5 г/см³.
- обладает сильным преломляющим эффектом, показатель преломления (от 2,415 до 2,423)
- На воздухе алмаз сгорает при 850° С с образованием CO_2 ; в вакууме при температуре свыше 1500° С переходит в графит.
- Не растворим в кислотах и щелочах.
- Модуль Юнга 0,9 ТПа.

- Относительная твердость по шкале Мооса 10.
- Удельная прочность $2,5 \cdot 10^7$ — $6,5 \cdot 10^7$ Н·м/кг.

Карбин – представляет собой одномерную форму углерода, состоящую из «sp -гибридизованных» атомов углерода. Кристаллы состоят из линейных цепочек углеродных атомов, соединенных чередующимися одинарными и тройными связями. По твёрдости карбин располагается выше графита, но значительно уступает алмазу. Атомная кристаллическая решетка карбина показана на рисунке 1.4.

Свойства карбина:

- плотность $1,92$ г/см³.
- При нагревании до 2800 °С и давлении в 1 атм без доступа воздуха превращается в графит.
- Удельная прочность $6 \cdot 10^7$ — $7,5 \cdot 10^7$ Н·м/кг.
- Удельная жесткость (около 10^9 Н·м/кг).

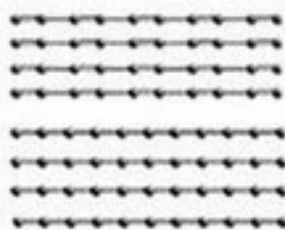


Рисунок 1.4 – Атомная кристаллическая решетка карбина

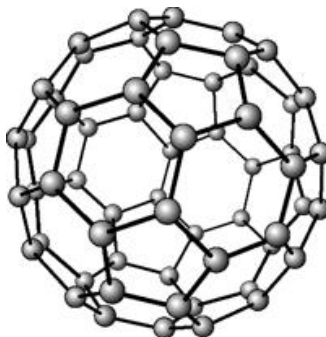


Рисунок 1.5 – Атомная кристаллическая решетка фуллерена

Фуллерены — это молекулярные соединения, являющиеся модификацией углерода, имеющие замкнутые каркасные структуры, состоящие из 3-х координированных атомов углерода и имеющих 12 пятиугольных и $(n/2 - 10)$ шестиугольных граней ($n \geq 20$). Особенностью считается то, что любой пятиугольник соседствует лишь только с шестиугольниками, что можно увидеть на рисунке 1.5. Молекула C_{60} представляет собой атомы углерода, связанные друг с другом ковалентной связью. Данная связь обусловлена обобществлением валентных электронов атомов.

Свойства фуллерена:

- плотность 1,68 г/см³.
- существует, как стабильное вещество до 850 °С.
- температура плавления = 500-600°С.
- Полупроводник.

Графит используется для производства грифелей карандашей, электродов, плавильных тиглей, как замедлитель нейтронов в ядерных реакторах, как смазочный материал; алмазы используются в ювелирном деле, в качестве режущего инструмента, в буровом оборудовании, как абразивный материал; в качестве восстановителя углерод используют для получения некоторых металлов и неметаллов (железа, кремния); углерод составляет основную массу активированного угля, который нашел широчайшее применение, как в быту (например, в качестве адсорбента для очистки воздуха и растворов), так и в медицине (таблетки активированного угля) и в промышленности (в качестве носителя для каталитических добавок, катализатора полимеризации и проч.).

Углеродное покрытие – это вариация алмазных (sp^3) и графитоподобных (sp^2) связей [19]. Такие покрытия отличает аморфность их строения, которая указывает об отсутствии дальнего порядка и наличии ближнего порядка в покрытии.

В зависимости от наличия и количества водорода (H_2) (рисунок 1.6), в структуре, формируемые покрытия подразделяют на следующие группы [5]:

– $ta-C$, плёнки получаемы при распылении графитовых мишеней с плотностью осаждения порядком 3 г/см^2 . Эта группа плёнок, насыщена sp^3 связями (обычно $> 70\%$). В случае, когда плотность потока частиц, эмитирующих с графитовой мишени, оказываются менее $< 2 \text{ г/см}^2$ плёнка имеет преимущественно sp^2 -связи и её называют аморфным углеродом ($a-C$).;

– Плёнки, насыщенные водородом (до 50%) представляют собой класс гидрогенизированного аморфного углерода ($\alpha -C:H$) и DLC ($DLC:H$). Эти покрытия далее делятся на 4 подгруппы, указанные на рисунке 1.7.

1. $\alpha-C:H$ (PLCH) покрытия, содержащие в своей структуре $40 - 50\%$ водорода и имеющие в основном sp^3 связи. Такие покрытия имеют низкую твердость ($< 10 \text{ ГПа}$) и низкую плотность ($1,2 - 1,6 \text{ г/см}^3$) [5] это связано с тем, что основная масса sp^3 связей скоординированы с атомами водорода.

2. $a-C:H$ ($DLC:H$) покрытия, содержат $20 - 40\%$ водорода. Из – за большого количества одинарных $C - C$ sp^3 связей, механические свойства таких плёнок выше, чем у PLCH. Плотность алмазоподобных покрытий $1,6 - 2,3 \text{ г/см}^3$, а твердость лежит в пределах $10 - 80 \text{ ГПа}$.

3. Гидрированные тетраэдрические аморфные углеродные пленки ($ta-C:H$) Плотность у этих пленок составляет $2,4 \text{ г/см}^3$, а твердость до 50 ГПа [5] доля sp^3 -фазы ($\sim 70\%$).

4. Плёнки $a-C:H$ с низким содержанием H (менее 20%) называются графитоподобными $a-C:H$ (GLCH).

Алмазоподобный углерод (DLC) представляет собой аморфную форму углерода с большой долей sp^3 . Его можно наносить в виде тонких пленок на различные поверхности, используя различные методы, например, такие, как катодно-дуговое осаждение, магнетронное распыление [4].

DLC-пленки широко применяются в качестве защитных покрытий в таких областях, как оптика – оптические фильтры для ИК-области [13,11], машиностроение – покрытия для увеличения эксплуатационного периода деталей, медицина – биомедицинские покрытия [9,8].

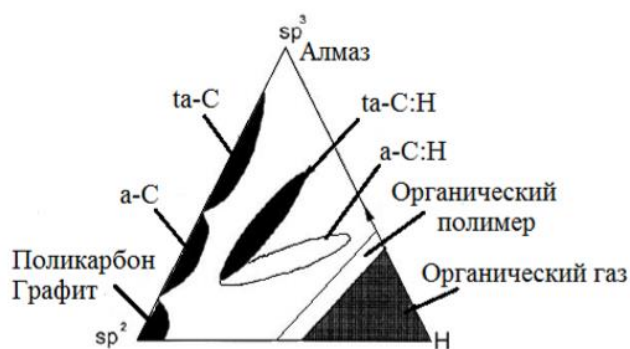


Рисунок 1.6 – Фазовая диаграмма углеродных покрытий

Алмазоподобные покрытия характеризуются большим количеством sp^3 связей, за счёт этого этот материал имеет достаточно высокую твердостью и высокий модуль упругости. Фазовая диаграмма углеродных покрытий показана на рисунке 1.7[12]. Твёрдость алмазоподобных углеродных покрытий (АПП) находится в пределах 10-90 ГПа, модуль Юнга в 5-10 раз больше. Такие покрытия отличаются высокими внутренними напряжениями в диапазоне 0,5-10 ГПа [14]. Напряжения могут быть уменьшены за счет включения в пленки примесей N, Si, O или атомов металлов, хотя уменьшение напряжений часто связано с уменьшением твёрдости и повышением модуля упругости пленок. Физические свойства АПП напрямую коррелирует с количеством водорода в их составе, а также с количеством гибризированных sp^3 или sp^2 связей (чем больше sp^3 связей в покрытие, тем оно более твердое).

| Материал/ свойства | Плотность | Зона оптической видимости | Твердость | Sp^3 | Содержание водорода |
|-----------------------|-----------|---------------------------------|-----------|--------|------------------------|
| Алмаз | 3,515 | 5,5 | 100 | 100 | 0 |
| Графит | 2,267 | 0 | - | 0 | 0 |
| ta-C | 3,1 | 2,5 | 80 | 80-88 | 0 |
| Жесткий a-C:H | 1,6-2,2 | 1,1-1,7 | 10-20 | 40 | 30-40 |
| Мягкий a-C:H | 1,2-1,6 | 1,7-4,0 | <10 | 60 | 40-50 |
| ta-C:H | 2,4 | 2,0-2,5 | 50 | 70 | 30 |

Рисунок 1.7 – Свойства различных форм углерода

Гидрированный аморфный углерод с низкой концентрацией водорода часто называют «жестким» а-С:Н из-за его высокой твердости [22]. В твердом а-С:Н превалирует содержание sp^2 -типов связи над sp^3 [11]. Обратная же ситуация, когда плёнка содержит большое количество водорода в своём составе приводит к образованию «мягкого» а-С:Н [3]. Низкая твердость этих покрытий связана с наличием одновалентного водорода, который располагается на краях кристаллической решетки. Покрытия с небольшой насыщенностью атомами водорода и высокой концентрацией sp^3 -связей называются та-С:Н [12]. Широкий спектр различных применений АПП покрытий обусловлен уникальными физико – механическими и химическими свойствами такими, как: высокая твердость, инертность к большинству химических растворов, низкий коэффициент трения, прозрачность в ИК спектре, настраиваемые оптические коэффициенты, биосовместимость и т.д. [9,20].

Химическая инертность, низкое трение и высокая механическая твердость делают плёнки DLC очень подходящими для защитных покрытий в различных областях, таких как трибология, магнитные накопители и их головки для чтения и записи [10]. DLC-пленки используются в качестве биосовместимого наружного слоя для медицинских имплантатов, таких как протезные клапаны сердца и в качестве износостойких покрытий для замены суставов [8-9].

Основные свойства защитно-декоративных DLC покрытий:

- высокие декоративные и износостойкие свойства;
- толщина: 1-3 мкм;
- твердость: 20-40 ГПа.

Свойства износостойкого DLC покрытия:

- увеличения срока эксплуатации: до 3 раз;
- толщина: 1-3 мкм;
- твердость: до 60 ГПа.

Свойства упрочняющего DLC покрытия:

- увеличения срока эксплуатации: до 2 раз;
- коэффициент трения: до 0,1;

- толщина: 0,5-3 мкм;
- твердость: 20-50 ГПа.

Методы получения DLC пленок



Рисунок 1.8 – Классификация методов получения алмазоподобных покрытий [21]

Для нанесения углеродных плёночных покрытий выделяют два основных метода – это методы: физического осаждения из газовой фазы или Physical Vapor Deposition (PVD) и химического осаждения из паровой фазы или Chemical Vapor Deposition (CVD).

К методам PVD относятся: термическое испарение; магнетронное распыление; катодно – дуговое испарение; импульсное лазерное распыление.

К методам CVD относятся ионно-ассистированное осаждение из углеводородной плазмы, возбуждаемой ВЧ–, СВЧ–, тлеющим, или дуговым разрядами в газе. В таблице 1 представлены характеристики методов нанесения покрытий.

PVD методами можно получать как алмазоподобные покрытия, тетраэдрический аморфный углерод, так и аморфные пленки углерода. В отличие от химических методов, физические методы являются более безопасными, дешевыми и безотходными [21].

Таблица 1.1 – Методы нанесения и свойства углеродных покрытий.

| Метод | Скорос ть роста покрыт ия, нм/с | Температ ура изделия, К | Структура | Плотно сть, г/см ³ | Удельное электросоп ротивление , Ом.см | Содержа ние водород а, % | Микрот вердост ь, ГПа |
|--------------------------------------|--|----------------------------------|--|-------------------------------------|---|-----------------------------------|-----------------------------|
| Химическое из паровой фазы | 1 – 90 | 770 – 1475 | кристалл алмаз | 2, – 3,3 | $10^{12} - 10^{16}$ | <10 | 65 – 95 |
| Электронно – лучевое испарение | 0,01 – 5 | 293 | аморфная | 1,4 – 2,5 | 10^{-1} | <1 | – |
| Лазерная абляция | 0.01 – 2 | 293 | аморфная | 2,5 | $10^3 - 10^6$ | <1 | – |
| Ионно – лучевое испарение | 0,005 – 0,03 | >300 | аморфная + включения кристаллич еские | 2 | $10^3 - 10^6$ | <1 | – |
| Магнетрон ное распыление | | 400 – 600 | | | | | |

Один из таких способов нанесения покрытий является - импульсное лазерное испарение.

Мишень испаряется при воздействии на её поверхность лазерного луча высокой мощности при давлении $10^{-5} - 10^{-3}$ Па. Длительность импульса генерации (FWHM) в эксимерном лазере составляет 6...20 нс [23].

Преимущества метода: возможность получения многокомпонентных покрытий, высокая чистота покрытий. Недостатки метода: сложность конструкции, неравномерность покрытия по толщине. Типичная схема PLD показана на рисунке 1.9.

Использование ионно-плазменных методов позволяет за один технологический цикл реализовать различные технологические процессы: ионной очистки и травление поверхности, модифицирование поверхностного слоя и нанесения покрытия.

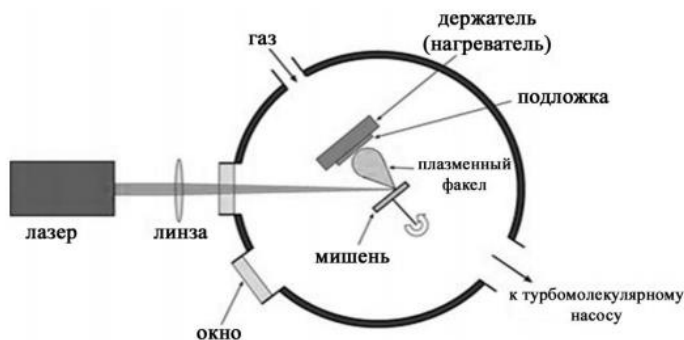


Рисунок 1.9 – Типовая схема метода PLD [1]

Метод дугового осаждения обладает наибольшей скоростью роста покрытия перед другими методами. Главным недостатком метода является наличие капельной фракции в плазменном потоке и её влияние на свойства получаемых покрытий [24]. Однако, благодаря успеху в разработке фильтрационных узлов, обеспечивающих удаление капельной фазы, позволяет формировать покрытие с более низкой шероховатостью. Распространённый способ получения углеродных покрытий (α -C) осаждение из фильтрованной катодно-дуговой плазмы. С помощью такого способа можно получить углеродные плёнки с микротвердостью 40–75 ГПа, модулем упругости 450–700 ГПа [20]. В качестве низкотемпературной плазмы используется плазма катодно-дугового разряда, горящего в парах эмитируемой графитовой мишени. Типовая схема катодно-дугового осаждения показана на рисунке 1.10.

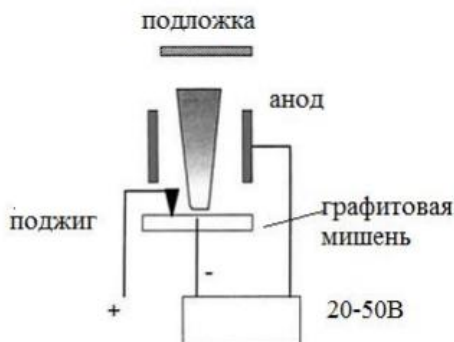


Рисунок 1.10 – Схема вакуумно-дугового осаждения материалов

В магнетронных распылительных системах (МРС) распыление материала происходит в плазме аномального тлеющего разряда за счёт ионизации рабочего газа и бомбардировки поверхности катода. Электроны, распыляемые с катода (мишени) под действием бомбардировки, захватываются магнитным полем и совершают циклоидальное движение по замкнутым траекториям в скрещенных электрическом и магнитном полях. Основными параметрами положительно характеризующими МРС является высокая плотность ионного тока и большая удельная мощность, рассеиваемая на катоде, эти параметры достигаются за счёт локализации плазмы у поверхности мишени [25]. Основным преимуществом МРС является возможность получения равномерных по толщине пленок на подложках большой площади, небольшая температура подложки и высокая адгезия. Недостатком является небольшие скорости осаждения.

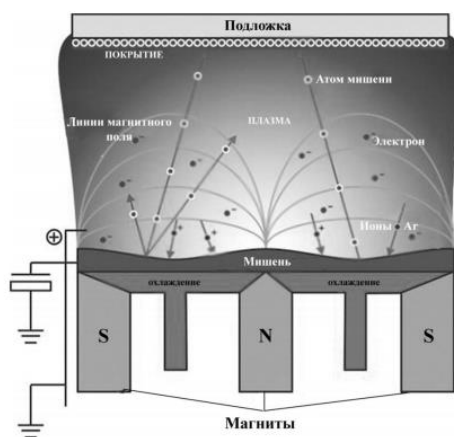


Рисунок 1.11 – Принципиальная схема МРС

К основным рабочим характеристикам магнетронных распылительных систем относятся: величина индукции магнитного поля, давление рабочего газа, напряжение на катоде и плотность тока на мишени. Мишень распыляется при давлении от 0,05 до 1 Па [26]. В качестве рабочих газов выбирают Ar, N₂, O₂, CH₄. Покрытия можно наносить как на металлы, так и диэлектрики. Типовая схема МРС показана на рисунке 1.11.

Метод химического осаждения из паровой фазы (газовое осаждение с нагретой нитью) Рабочая смесь (метан, водород) подается в рабочий объем, где

вблизи нагретой нити происходит диссоциация молекулярного водорода (H_2) в атомарный ($2H$). Разложение метана происходит при взаимодействии атомарного водорода также вблизи нити, как показано на рисунке 1.12.

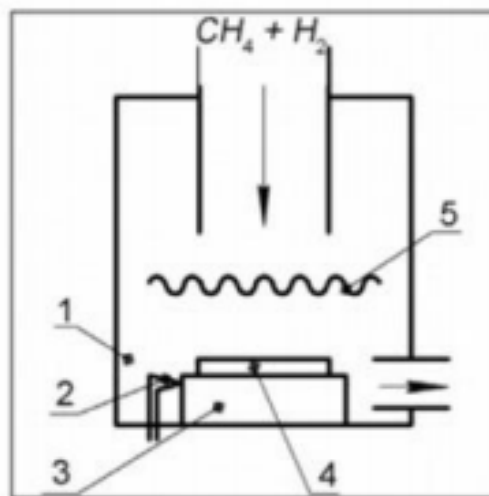


Рисунок 1.12 – Схема установки термического газозащитного осаждения 1 – газовакуумная камера; 2 – датчик температуры (термопара); 3 – держатель подложки; 4 – подложка; 5 – нагретая нить

На подложке растет пленка из углеродосодержащих радикалов (sp^3 – алмаз, sp^2 – графит, аморфный углерод). Рост алмазной фазы подбирается параметрами осаждения: температура подложки, концентрация углеводородов). Основные параметры: температура подложки 680-1100°C, давление в камере 1500 - 6000 Па., относительное содержание метана в смеси 0,5 - 3%, расход газа 70- 600 см³/мин, температура нити 1900-2300°C. Наличие проволочного нагревателя, материал которого может попадать на поверхность изделия. Постоянный контроль за протеканием реакции в реакторе и дорогие химреагенты являются недостатками данного метода.

1.2 Методы травления твердого тела

Удаление приповерхностного слоя в твердых телах имеет важное технологическое значение в различных отраслях промышленности начиная от

машиностроения и заканчивая микроэлектроникой, и в каждой из отраслей важнейшими требованиями к удалению нанесенных пленок является: анизотропия, селективность и скорость травления. Селективностью называют отношение скорости травления одного материала к скорости травления другого.

Существует два основных вида травления твердых тел: жидкостное и «сухое». Жидкостное травление представляет собой комбинации различных химических растворов в зависимости от удаляемого покрытия, которые показаны на рисунке 1.13.

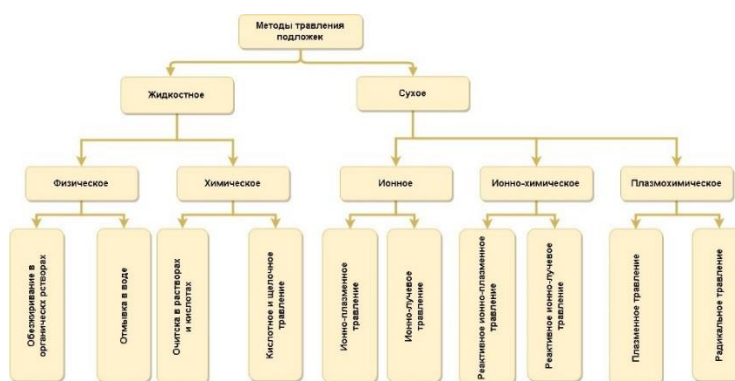


Рисунок 1.13 – Основные методы травления подложек

Типичный процесс жидкостного травления включает в себя следующую последовательность реакций:

- диффузия реагента к поверхности твердой фазы;
- адсорбция реагента;
- поверхностная реакция;
- десорбция продуктов взаимодействия;
- диффузия продуктов реакции от поверхности.

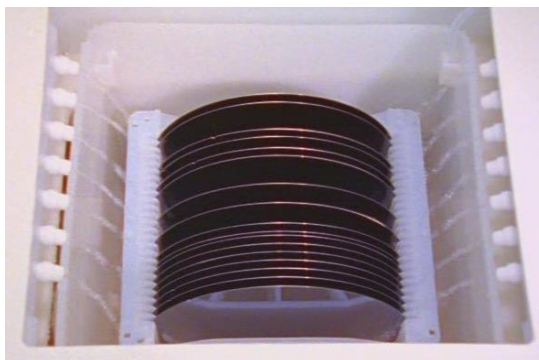


Рисунок 1.14 – Ванна для жидкостного травления кремниевых пластин

К основным достоинствам такого метода можно отнести: непосредственное влияние на скорость травления, за счет подбора параметров (концентрации раствора, температуры, скорости вращения центрифуги и т.д.), отсутствие структурных дефектов, большой выбор химических реагентов, высокая селективность и производительность процесса. Основными недостатками можно назвать: низкую анизотропию (невозможно получить профиль травления с вертикальными стенками), невозможность сохранения размеров, обязательную промывку образцов подверженных травлению, т.к. реакция в большинстве случаев продолжает идти после того, как образец вынут из раствора.

Практические пределы применимости процесса жидкостного определяются его разрешением $1,5\text{--}2,0\text{ мкм}$ - и уходом размеров при травлении $0,2\text{--}0,5\text{ мкм}$. Типичная схема жидкостного травления показана на рисунке 1.15.

Сухое травление подразделяется на 3 основных вида: ионное распыление, ионно-химическое травление в плазме и плазмохимическое травление. К первому виду можно отнести ионное травление т.к. оно имеет чисто физический метод воздействия на распыляемый материал.

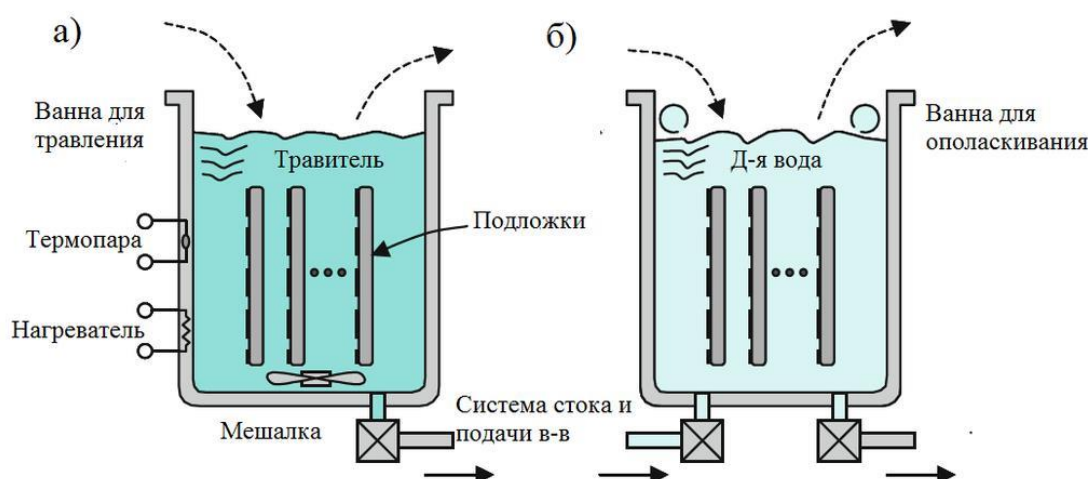


Рисунок 1.15 – Типичная схема жидкостного травления а) травление; б) ополаскивание подложки

Физическим ионно-плазменным (ИПТ) распылением называют процесс удаления материала с поверхности в результате бомбардировки поверхности ионами. Типичный процесс ионно-плазменного травления состоит из трёх этапов:

1. На первом этапе происходит удаление поверхностных загрязнений и незначительное изменение поверхностного слоя.
2. На втором этапе распыляется сам материал подложки и внедренные в него ионы, концентрация которых установилась.
3. На третьем этапе наблюдается падение скорости распыления материала пленки.

Материал подложки оказывает большое влияние на распыляемый поверхностный слой. В результате диффузии высокоэнергетических ионов до границы раздела плёнка – подложка происходит взаимная диффузия атомов подложки и поверхностного слоя. В результате проникновения иона с достаточной энергией в материал возникает каскад столкновений, в которых происходит обмен энергией и импульсом между атомами. Среднее время развития каскада столкновений порядка $2 \cdot 10^{-13}$ с. [16]. Масса ионов должна быть больше массы атомов материала, чтобы обеспечить вероятность возникновения каскада столкновений. В противном случае, ион с недостаточной энергией, не передаст поверхностным атомам энергию достаточную для распыления.

Распыление будет происходить, если энергия бомбардирующего иона превышает некоторое пороговое значение $E_{\text{пор}}$. Предполагая, что энергия связи поверхностного атома материала равна энергии сублимации (атомизации), пороговую энергию распыления можно оценить с помощью соотношения:

$$\frac{4M_1M_2}{(M_1+M_2)^2} E_{\text{пор}} \geq H \quad (1.3)$$

Отношение $4M_1M_2/(M_1+M_2)^2$, называемое коэффициентом аккомодации, характеризует долю энергии бомбардирующего иона, переданную атому материала в упругом столкновении (при $M_1=M_2$ коэффициент аккомодации максимален и равен 1). Для характеристики процесса ионного распыления

используется параметр S , называемый коэффициентом распыления, а также производный от него параметр – скорость распыления V_R . Коэффициент распыления определяется как количество распыленных атомов, приходящихся на один бомбардирующий ион (атом/ион).

При ионном распылении основным инструментом удаления поверхностного слоя является физическое распыление ионами рабочего газа, энергия которых обеспечивается регулировкой подачи отрицательного потенциала смещения на подложку, обычно энергия таких ионов лежит в интервале от 20 до 100 эВ, а для ионного травления от 100 до 1000 эВ [15].

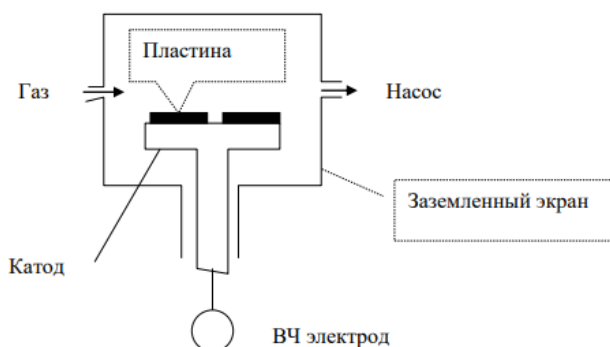


Рисунок 1.16 – ВЧ – диодная система для ионно-плазменного травления

Ионно-плазменное травление осуществляется в ВЧ диодной системе. образцы, помещаются на электрод, который является катодом и подключен к источнику ВЧ напряжения. Энергия ионов определяется разностью потенциалов ионной оболочки плазмы V_p и запитываемого электрода V_t , значения которых определены на рис. 1.17.

Значение $V_p - V_t$ возрастает по мере уменьшения площади ВЧ электрода, поскольку увеличивается сопротивление ионной оболочки (когда к электроду прикладывается отрицательное напряжение относительно плазмы (или относительно анода, поскольку потенциал плазмы обычно близок к потенциалу анода), электроны плазмы, находящиеся вблизи электрода, отталкиваются от него и в приэлектродной области образуется оболочка из положительных ионов, сквозь которую ионы плазмы устремляются к электроду) и, следовательно, увеличивается падение напряжения на ней. Таким образом, физическое

распыление достигается путём снижения площади электрода по сравнению с заземлённым (при соотношении $\frac{S_{зап}}{S_{заз}} = 0,05$ значение $V_p - V_t$ составляет ~ 1000 В).

В данном способе обеспечиваются низкие значения селективности, что ограничивает его применение. Такой же недостаток характерен и для ионно-лучевого травления, в котором получаемые ионы инертного газа физически отделены от стравливаемой подложки системой электродов.

Главным преимуществом ионного травления является очистка поверхности материала, простота установки, а также конструкционная встраиваемость с другими устройствами осаждения и травления в одной вакуумной камере. Основным недостатком является отсутствие контроля за равномерностью травления.

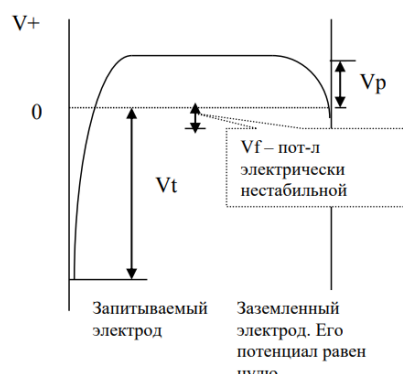


Рисунок 1.17 – Распределение потенциала в плазме

В реактивном ионно – плазменном травлении (РИТ) в отличие от ионного травления задействуется помимо физического распыления ещё и химическое. Благодаря этому, удаление материала происходит, как за счёт физического распыления, так и за счёт реакций между поверхностью травимого образца и свободными атомами, и радикалами.

При проведении РИТ физический и химический механизмы не являются независимыми: физическое распыление активирует поверхность материала, повышая скорость химических реакций, увеличивая тем самым скорость физического распыления, за счёт ослабления химических связей. Поэтому скорости соответствующих процессов складываются неаддитивно [16], то есть

количество материала, удаленного при одновременном протекании обоих процессов, больше суммы парциальных скоростей химической реакции и физического распыления.

Вклад химического и физического распыления в реактивном ионно – плазменном травлении индивидуален для каждого конкретного случая и зависит от вида рабочего газа, мощности разряда и размерами рабочей камеры [7]. В низкотемпературной плазме степень ионизации обычно не превышает десятых долей процента, тогда как степень диссоциации, определяющая концентрацию нейтральных химически активных частиц (ХАЧ), достигает нескольких десятков процентов. В случае высокой концентрации ХАЧ образуется большое количество летучих соединений между материалом подложки и химическими частицами, в этом случае основной вклад в РИТ вносит химический механизм травления. При небольшой концентрации ХАЧ, происходит превалирование физического распыления, однако если энергия ионов становится меньше 100 эВ, механизм физического травления будет не так существенным.

Реактивное ионное травление реализуется в различных вакуумных объемах, типичная схема РИТ представлена на рисунке 1.18.

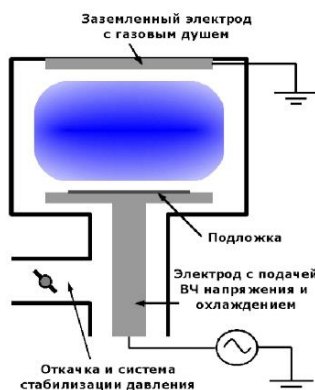


Рисунок 1.18 – Схема реактивного ионного травления РИТ

Основными параметрами, влияющими на процесс РИТ являются вид механизма травления (химический или физический), мощность источника (увелечение мощности ведёт к увеличению скорости травления, за счёт генерации ХАЧ и ионов рабочего газа), давление рабочего газа (при увеличении

потока рабочего газа снижается длина пробега частиц и увеличивается кол-во столкновений между ними, за счёт этого увеличивается число химически активных частиц и ионов). Однако, при достижении определенного значения по давлению рабочего газа происходит снижение удельной энергии частиц, которой уже не хватает на ионизацию и диссоциацию. При давлении выше 100 Па характеристики РИТ приближаются к характеристикам плазменного травления. Также, немаловажным является, замедление скорости травления при химическом механизме, которое вызвано большой площадью травимой поверхности.

Равномерность реактивного ионно – плазменного травления определяется двумя источниками: равномерностью взаимодействия химически активных частиц с травимым материалом и температурой подложки.

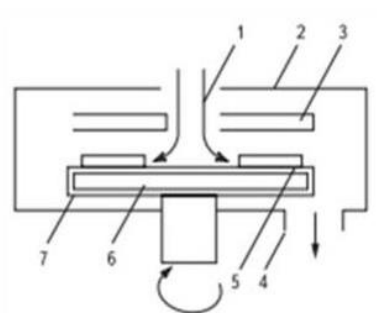
Также, как и ИПТ, реактивное ионно – плазменное травление, за счёт вклада физического распыления, порождает поверхностные дефекты на поверхности подложки, загрязнение поверхности, за счёт распыления внутрикамерной арматуры. Однако, благодаря вкладу химического травления, такие недостатки незначительны. Например, если скорость удаления материала в результате химической реакции достаточно высока, то нарушенные ионной бомбардировкой слои успевают стравиться, прежде чем дефекты диффундируют из них в глубь материала. Для устранения нежелательных изменений электрофизических параметров обрабатываемых слоев, границ раздела между слоями и рабочих характеристик приборов образцы после процессов РИТ можно подвергнуть восстанавливающему отжигу.

Ещё один способ удаления поверхностного слоя подложки – плазмохимическое травление. Основным механизмом в данном случае является – химический процесс образования летучих соединений так, как в данном методе используются ионы с энергией, не превышающей 100 эВ (данная энергия не обеспечивает должного уровня физического распыления) [16]. Данный метод схож с РИТ, но здесь ионы и электроны выступают в качестве активатора травимой поверхности, за счёт такой активации повышается количеством

взаимодействий между ХАЧ и эксплуатационным слоем, что в свою очередь значительно увеличивает скорость травления. Степень активации поверхности зависит от энергии, которую сообщает ей ионы и электроны, в свою очередь энергия частиц зависит от потенциала смещения на подложке, чем выше потенциал, тем выше энергия. Основным механизмом в данном случае является – химический процесс образования летучих соединений. В большинстве случаев вклад химической реакции между ионами и материалом в плазмохимическом травлении незначителен по сравнению с вкладом химической реакции с участием нейтральных активных частиц. Это объясняется тем, что концентрация ионов в плазме ($10^9 - 10^{11} \text{ см}^{-3}$) значительно ниже концентрации нейтральных активных частиц ($10^{14} - 10^{16} \text{ см}^{-3}$) [1].

Процесс плазмохимической обработки подложек отличается от ионно-плазменного процесса тем, что удаление вещества с поверхности подложки происходит не только в результате бомбардировки ее положительно заряженными ионами плазмы, но и вследствие химического взаимодействия подложки с активными реагентами плазмы. Таким образом, при плазмохимической обработке подложек большое значение имеет высокая химическая реакционная способность компонентов плазмы.

Генерацию энергетически и химически активных частиц для осуществления плазменного травления производят в реакторах, которые в зависимости от вида конкретного процесса должны удовлетворять определенным требованиям. В первую очередь, должны обеспечиваться заданные скорость и равномерность процесса при приемлемых мощности разряда и расходе рабочего газа. Таким требованиям удовлетворяют реакторы с объемным расположением подложек в плазме и реакторы диодного типа, в которых подложки размещают на плоских электродах.



- 1 – подача рабочего газа;
- 2 – вакуумная камера;
- 3 – электрод;
- 4 – откачной патрубок;
- 5 – пластина (подложка);
- 6 – подложкодержатель;
- 7 – изоляционное покрытие

Рисунок 1.19 – Схема ПХТ диодного типа

На рисунке 1.19 показана схема ПХТ диодного типа. Подложка размещается на заземленном электроде. ВЧ напряжение подводится к противоположному электроду. Для подачи реакционных газов в зону разряда используется подвод газа через т.н. газовый душ в нагруженном электроде.

При зажигании емкостного разряда, происходит разложение газовой смеси на электроны, ионы и активные радикалы. Травление происходит большей частью за счет активных радикалов. Ионная бомбардировка подложки, расположенной на заземленном электроде, минимальна из-за существенной асимметрии разряда.

Основными рабочими параметрами, определяющими характеристики процесса плазменного травления, являются: мощность, вкладываемая в разряд, рабочее давление, расход газа и способ его подвода к обрабатываемой поверхности, температура подложек, состав используемого газа.

При проведении ПХТ важен выбор не только рабочего газа, но и добавок к нему, которые, не принимая непосредственного участия в процессе травления, могут существенно увеличить эффективность использования основного газа. Основным механизмом влияния газа-добавки на скорость ПХТ является увеличение концентрации ХАЧ в реакторе, которое может реализоваться через:

- уменьшение вероятности рекомбинации ХАЧ на стенках реактора;

- увеличение скорости генерации ХАЧ.

Последний механизм может реализоваться как через появление дополнительных каналов диссоциации молекул при взаимодействии с возбужденными частицами газовых добавок, так и через увеличение скорости диссоциации электронным ударом при изменении электрофизических параметров плазмы.

Для плазмохимического травления вид потенциала смещения подаваемого на подложку не играет большой роли, он может быть как положительным (в случае положительного смещения дополнительно в стимуляция процесса участвуют рекомбинируемые отрицательные ионы), так и отрицательным, это говорит о том, что ионы и электроны одинаково эффективно справляются с задачей активации поверхности, обеспечивая десорбцию продуктов реакции, и стимуляции химического процесса.

Магнитное поле придаёт электронам циклоидальную траекторию движения за счёт этого увеличивается количество столкновений между частицами, что способствует более интенсивному образованию химически активных частиц.

С увеличением доли физического распыления, за счёт увеличения мощности является фактором снижения селективности процесса ПХТ.

Основными недостатками данного метода являются: изменение профиля поверхности за счёт распыления внутрикамерной арматуры, образования нелетучих соединений, а также за счёт высокой скорости травления, которая может привести к переосаждению травимого материала подложки. Однако, все эти недостатки могут быть решены путём использования рабочих газов, инертных к материалам вакуумной камеры и внутрикамерной арматуры, а также подбора режимов травления, которые исключают возможность переосаждения.

Основным фактором, определяющим характеристики травления (скорость, селективность), является состав атмосферы вакуумной камеры. Благодаря подбору оптимального давления и скорости потока рабочего газа в рабочий объём возможно управление скоростью и селективностью травления.

На рисунке 1.20 изображена схема ПХТ с симметричным расположением электродов.

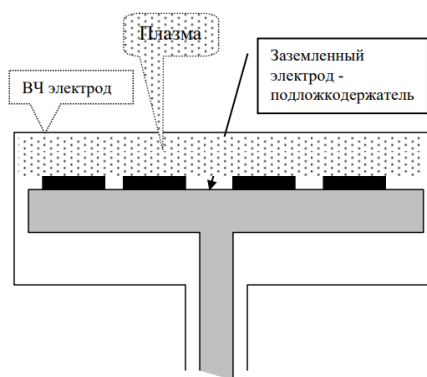


Рисунок 1.20 – Система ПХТ с симметричным расположением электродов

Скорость травления зависит от концентрации в плазме основных компонентов (атомов, ионов, радикалов). Потери компонентов могут осуществляться как за счёт реакций в плазме, так и на поверхности травления. Если доминирующим механизмом потерь является само травление (поверхности), то чем больше площадь травления, тем меньше скорость травления. Качественно зависимость скорости травления от площади отражена на рисунке 1.21.

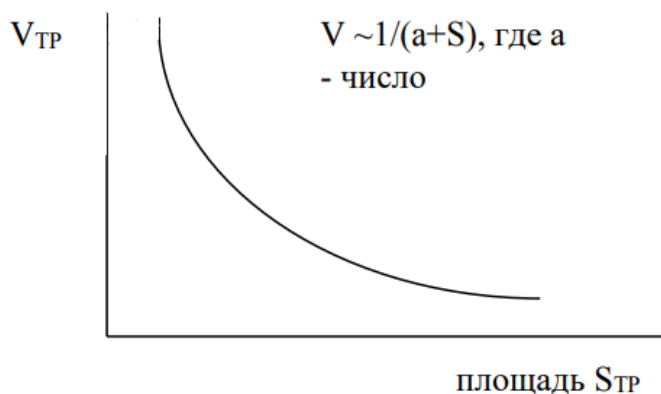


Рисунок 1.21 – Зависимость скорости травления от площади поверхности, подвергаемой травлению

Типичный процесс сухого травления выглядит следующим образом:

- Доставка молекул активного газа (рабочей смеси) в зону высокочастотного разряда.

– Превращение молекул в активные радикалы и под воздействием электронов в плазме разряда.

– Взаимодействие радикалов с материалом (плёнкой), включающее в себя адсорбцию радикалов на поверхности, химическую реакцию (часто ионно – стимулируемую) и последующую десорбцию продуктов реакции.

– Удаление продуктов реакции.

Главным преимуществом плазменных методов травления перед жидкостным химическим методом является возможность достижения высокоанизотропного профиля при низкой шероховатости дна и стенок микрорельефа, а также высокая равномерность травления, предсказуемость и повторяемость результатов. Сравнительная таблица «сухих» методов травления показана ниже.

Таблица 1.2 – Сравнение параметров процессов травления

| Параметр процесса | ИТ | ИХТ | ПХТ |
|------------------------|---------|---------|---------|
| Скорость травления | низкая | средняя | высокая |
| Равномерность процесса | низкая | средняя | высокая |
| Селективность | низкая | средняя | высокая |
| Анизотропность | высокая | средняя | низкая |

1.3 Индуктивно-связанный источник для формирования газоразрядной плазмы

Для новых более совершенных технологических процессов требуется создание нового технологического оборудования, использующего наиболее перспективные вакуумные ионно-плазменные процессы. В последние годы возрос интерес к системам и методам, использующим явления в ВЧ- и СВЧ-плазме. Обеспечивая генерацию плазмы высокой плотности (более 10^{11} см^{-3}) [2] и высокие скорости обработки, эти системы имеют сравнительно низкий уровень теплового и зарядового воздействия на обрабатываемые структуры, а также обеспечивают высокую чистоту процесса, поскольку работают при сравнительно

низких давлениях и сводят к минимуму возможность паразитного распыления элементов внутрикамерной арматуры.

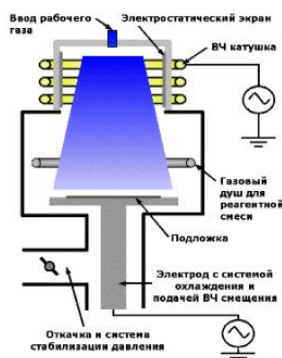


Рисунок 1.22 – Схема реактивного ионного травления с источником индуктивно связанной плазмы.

На рисунке 1.22 показана схема радиочастотного генератора плазмы, который предназначен для создания и поддержания газоразрядной низкотемпературной плазмы в рабочих объёмах вакуумных технологических установок в непрерывном режиме. Конструктивно устройство включает в себя: корпус, защитный экран, закрывающий рабочую плоскость устройства, коаксиальный ввод, вывод для подключения ВЧ мощности, вывод для подключения земли, штуцеры для подключения охлаждающей воды. Внутри устройства размещён индуктор в виде плоской спирали, создающий высокочастотное магнитное поле в пространстве перед рабочей поверхностью устройства. Плазма создаётся путём инициации и поддержания индукционного высокочастотного разряда в рабочем газе под действием переменного магнитного поля высокой частоты. Ввод энергии в плазму происходит в тонком слое ($\sim 5...10$ мм) [2] вблизи рабочей поверхности устройства, распространение плазмы по рабочему объёму и перераспределение энергии происходит за счёт диффузии носителей заряда. В зависимости от величины давления в рабочем объёме, плазма может быть как локализована в непосредственной близости от устройства, так и заполнять весь объём камеры. Потери плазмы и выделение вложенной в разряд мощности происходит на поверхности всех помещённых в неё (плазму) деталей конструкции рабочего

объёма и внутрикамерной оснастки (стенок камеры, заземлённых и изолированных электродов, мишеней, подложек, самого устройства и т.д.). В связи с этим, при проектировании или модернизации технологических установок и внутрикамерной оснастки следует учитывать возникающие тепловые нагрузки и плазмастимулированную десорбцию газов с поверхностей внутрикамерного объема. Размещение вблизи рабочей поверхности проводящих деталей приводит к возбуждению в них вихревых токов, что уменьшает магнитное поле, создаваемое устройством, и затрудняет зажигание разряда.

Для субмикронного плазмохимического травления необходимо создать плазму высокой плотности (более $3 \cdot 10^{11} \text{ см}^{-3}$) [2] при низком давлении (менее 1 Па), обеспечивающем высокую анизотропию травления, чтобы сформировать желаемый профиль травления на подложке. Основные требования к современным плазменным источникам включают в себя также хорошую равномерность распределения плазмы, низкую и контролируемую энергию ионов и минимальное загрязнение от распыления арматуры реактора.

Использование ВЧ разряда индуктивно связанной плазмы (ICP) как плазмообразующего источника предоставляет большие преимущества для технологии изделий с микро- и наноэлементами. В частности, высокую плотность плазмы (10^{11} – 10^{12} см^{-3}), минимальный разброс ионов по энергиям ($\Delta e_i \leq 5 \text{ эВ}$), относительно низкое рабочее давление (10^{-2} ... 10^{-1} Па) и низкую энергетическую цену иона (30–80 эВ/ион) [2]. Благодаря отсутствию накаливаемых узлов, источник ICP обладает большим ресурсом работы с химически активными газами. Кроме того, он предоставляет возможность независимого управления энергией и плотностью потока ионов, поступающих на подложку. Успехи в конструировании источников ICP для целей микроэлектроники побудили разработчиков оборудования применить их и в других отраслях, например в азотировании стальных деталей, обработке полимерных пленок и нанесении специальных покрытий методами физического осаждения из паровой фазы (PVD) и плазмо-химического осаждения из паровой

фазы (PECVD), а также для удаления технологических покрытий с различного рода изделий.

Газоразрядная плазма имеет множество технологических применений, большинство из которых связано с использованием ее ионной компоненты. Отличие ионов от нейтральных атомов заключается в наличии у них электрического заряда, что позволяет влиять на их движение электрическими полями. В частности, возможно ускорение иона по направлению к подложке путем придания ее поверхности отрицательного относительно плазмы электрического потенциала [7].

В газоразрядной плазме возможны различные химические реакции: ионизация, диссоциация, рекомбинация, ассоциация в различных вариантах. Неизотермичность газоразрядной плазмы позволяет происходить реакциям, которые невозможны либо крайне медленны при той температуре, какую имеют ионы и нейтральные частицы. Например, реакция диссоциации молекулярного азота, в изотермических условиях заметно протекающая при температуре выше 5000 К, в плазме газового разряда эффективно происходит в камере с комнатной температурой стенок.

Другой особенностью плазмы низких давлений, в которой размер разрядного объема не превышает нескольких длин свободного пробега нейтральных атомов, является то, что вероятность реакций ассоциации и рекомбинации с участием даже двух частиц существенно меньше, чем диссоциации и ионизации. В этой связи основным химическим процессом в плазме является образование свободных радикалов (в том числе в ионизованном виде), а образование новых химических соединений происходит на стенках разрядного объема.

Газоразрядная плазма воздействует на подложку:

- потоками заряженных частиц: ускоренных ионов, электронов и радикалов;
- потоками незаряженных, в том числе химически активных, частиц;

- УФ излучением.

В результате имеют место, нагрев подложки, ее распыление, изменение электрического потенциала; химические реакции на поверхности, приводящие к химическому травлению подложки или росту на ее поверхности слоев сложного состава. Все эти факторы используются в эффективных технологических процессах, которые будут описаны в следующих главах. Они также могут иметь вредные нежелательные последствия, поэтому всегда должны учитываться в технологических применениях плазменных процессов.

При низких давлениях рабочего газа плазма не находится в состоянии теплового равновесия, и электромагнитная энергия наиболее эффективно передается электронной компоненте. Поскольку масса электрона на несколько порядков ниже массы ионов и нейтральных атомов, при столкновении он передает массивной частице лишь незначительную долю своей кинетической энергии. В то время как обмен энергией между близкими по массе частицами достаточно эффективен. Поэтому говорят, что плазма находится в квазиравновесном состоянии. Под этим подразумевается, что частицы разного сорта могут иметь стационарную температуру, но она у нейтральных частиц и ионов существенно меньше, чем у электронов. Электронная температура T_e , как правило, составляет 2~5 эВ [16], в то время как температура ионов не превышает 0,1 эВ. Тем не менее вызванные краевыми эффектами электрические поля ускоряют положительные ионы к границам приэлектродных слоев, сообщая им энергию порядка $eT_e/2$.

1.4 Особенности травления углеродных покрытий в плазме высокочастотного разряда

Использование ВЧ плазмы при плазмохимическом травлении даёт ряд преимуществ, за счёт переменного магнитного поля исключается возможность возникновения больших потенциалов в приэлектродных слоях. Энергия ионов,

поступающих на подложку, составляет обычно около 20–30 В [2], при этом она может при необходимости легко быть изменена отдельным источником питания смещения, постоянного, средне- или высокочастотного. Таким образом, становится возможным независимое управление потоками ионов (путем манипулирования мощностью, вкладываемой в источник плазмы), радикалов (за счет изменения давления и состава газовой смеси) и энергии падающих на подложку ионов (за счет изменения смещения).

Для осуществления плазмохимического метода обработки подложек может быть использована высокочастотная (ВЧ) газоразрядная плазма низкого давления с высокой плотностью, формирующая индуктивно-связанную плазму. Данный метод позволяет исключить распыления деталей внутрикамерной арматуры, а также позволяет независимо управлять энергией ионов, бомбардирующих обрабатываемое изделие, за счёт подведения источника напряжения смещения. Газовый разряд в рабочем объёме камеры возбуждается катушкой индуктивности в виде тонкой медной спирали, либо электродами, которые находятся вне вакуумной камеры. Что позволяет исключить загрязнение атмосферы камеры и обеспечить чистоту процесса травления.

Основными параметрами процесса травления являются рабочее давление газа P , его состав, мощность ВЧ-источника W и расход рабочих газов Q . Понижение давления газа P и повышение мощности разряда W приводят к увеличению средней энергии электронов и энергии, падающих на подвергаемую травлению поверхность ионов. Повышение мощности вызывает увеличение количества радикалов и ионов в плазме и, следовательно, скорости травления.

Основными параметрами процесса являются соотношение общее давление в рабочем объёме и мощность ВЧ источника (при низких давлениях и высокой мощности увеличивается удельная энергия электронов и бомбардируемых ионов, что приводит к интенсивному образованию ионов и радикалов) потоков рабочего газа и скорость его доставки к источнику плазмы (позволяет генерировать большее количество ХАЧ), также как и в случае с ПХТ

этот параметр играет роль либо при больших значения скорости потока, либо при небольших.

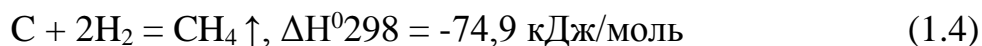
При взаимодействии углерода с водородом образуются алканы (предельные углеводороды), в молекулах которых атомы углерода соединены одинарными связями, а все остальные единицы валентности – насыщены атомами водорода.

Таблица 1.3 – Свойства метана

| Эмпирическая формула | Одновалентный радикал | Температура кипения, °С | Температура плавления, °С | Относительная плотность σ_4^{20} |
|----------------------|-----------------------|-------------------------|---------------------------|---|
| CH ₄ | -CH ₃ | -161,5 | -182,5 | 0,416 |

Метан — бесцветный газ, без запаха, мало растворимый в воде, несколько лучше — в спирте. В 100 объемах воды при 20° С растворяется примерно 3,3 объема, а при 0° С — примерно 5,5 объема метана. Это — постоянный газ; его критическая температура —82,1°С при 45,8 ат. Горит он бледным синеватым пламенем.

Термохимические уравнение:



Существует несколько способов получения метана: получение из электрической дуги, горящей в атмосфере водорода, нагревание углерода в атмосфере водорода до 400-500 °С при повышенном давлении в присутствии катализатора. Реакция протекает самовольно при обычных условиях. В сторону образования метана равновесие сдвигается при наличии измельченного никелевого катализатора и высоких давлений. Так же катализатором может выступать платина.

2 Экспериментальное оборудование

2.1 Лабораторная установка

Экспериментальная ионно-плазменная установка представленная на рисунке 2.1 была разработана и изготовлена в научно-образовательном центре Б.П. Вейнберга ТПУ и имеет возможность для нанесения тонкоплёночных покрытий и их травления.



Рисунок 2.1 – Экспериментальная ионно-плазменная установка

Установка включает в себя комплект магнетронов, ионный источник, радиочастотный генератор плазмы, планетарный подложкодержатель на 8 образцов, системой подачи рабочих газов (Ar , O_2 , H_2 , N_2). Схема установки представлена на рисунке 2.2.

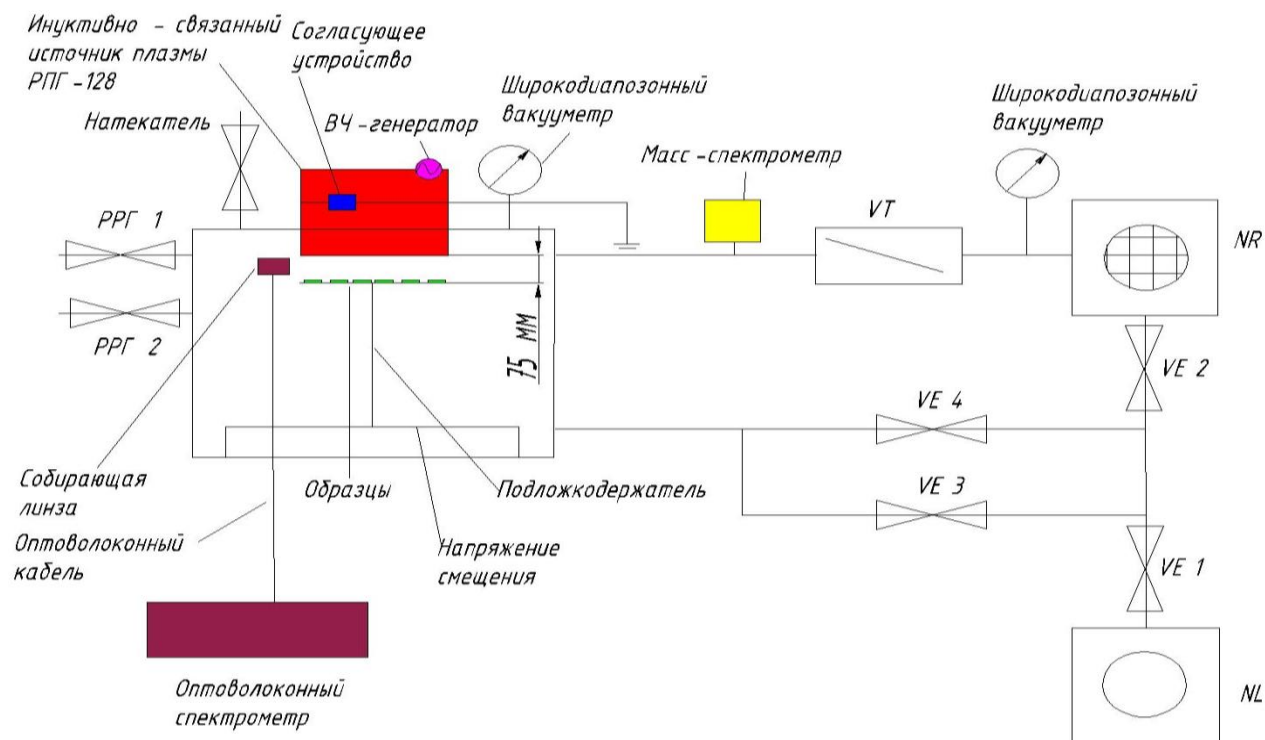


Рисунок 2.2 – Схема ионно-плазменной установки

Вакуумная схема установки основана на базе турбомолекулярного насоса с использованием безмасляного спирального насоса в качестве форвакуумного насоса и организована по классической двухступенчатой схеме. Клапан VE 4 позволяет достигать предварительного разряжения в объеме рабочей камеры, т.к. для нормальной работы турбомолекулярного насоса необходимо предварительное разряжение до давления порядка 100 Па. По достижении давления запуска турбомолекулярного насоса клапан VE 4 закрывается. Далее открывается клапан VE 2 и пневматический затвор VT 1 для достижения высокой степени вакуума в объеме рабочей камеры. Такая схема позволяет модифицировать вакуумную схему установки дополнительными безмасляными насосами. Напуск атмосферного давления производится через натекаль. Контроль давления в объеме производится при помощи широкодиапазонного вакуумметра. Установка оборудована 7 фланцами для прямой установки устройств различного технологического предназначения. В объеме вакуумной установки расположен вращающийся подложкодержатель, который позволяет обеспечивать как фиксированное положение подложек, так и вращение

планетарного типа. Напуск технологических газов производится непосредственно в объем рабочей камеры через специальные натекатели РРГ 1 и РРГ 2.

2.2 Пробоподготовка образцов

Полировально-шлифовальные машины используются для обработки образцов из сталей, сплавов и других материалов. Они необходимы для пробоподготовки поверхности изделий с целью последующей их плазменной обработки. В настоящей работе для пробоподготовки образцов из стали 12X18H10T использовалась полировально-шлифовальная машина МР-1В. Её внешний вид показан на рис. 2.3.



Рисунок 2.3– Полировально-шлифовальная машина МР-1В

Для удаления органических соединений, мелкой фракции с поверхности изделий необходимо их обезжирить. С этой целью можно использовать химическое травление или пробоподготовку в реактивах. В первом случае – может быть нарушен профиль поверхности изделия, что недопустимо для большинства применений, поэтому чаще используется второй приём. Для

металлических изделий требуется удалить загрязнения с поверхности, не допустив её окисления.

Для удаления органических соединений с поверхности изделий (стали (подложки из стали 12X18H10T) необходимо использовать следующую последовательность операций:

I. Механическая подготовка: шлифование подложки на установке MP-1B GRINDER POLISHER) на разных дисках (шероховатость диска: P400, P600, P1200, P2400, P4000) с использованием алмазной суспензии.

II. Химическая очистка – обезжиривание стали (последовательность данной операции описана ниже), выдержка в сушильном шкафу ШС-80-01 СПУ.

III. Ионная очистка: происходит непосредственно перед процессом нанесения покрытия.

Обезжиривание стали

- 1) Приготовить 3 % раствор флаттера (на 100 мл воды взвесить 3 г флаттера);
- 2) Положить образец в раствор;
- 3) Поставить на плиту, довести до кипения;
- 4) Кипятить - 8 мин;
- 5) Приготовить для предварительного промывания дистиллированную воду температурой 50-60°C и комнатной температуры;
- 6) Вынуть образец по истечению времени кипячения и поместить в горячую воду, затем в холодную;
- 7) Отнести стакан с образцом под проточную воду, мыть 5-7 мин;
- 8) Налить в стакан изопропиловый спирт, положить образец, довести до кипения, кипятить 1-2 мин;
- 9) Вынуть образец, сушить в парах спирта до полного его.

2.3 Индуктивно-связанный источник плазмы РПГ-128

Устройство предназначено для создания и поддержания газоразрядной низкотемпературной плазмы в рабочих объемах вакуумных технологических установок в непрерывном режиме. В Таблице 2.1 указаны основные технические характеристики.

Для получения тлеющего газового разряда в рабочем объёме, необходимо низкое давление, достаточное для запуска генератора плазмы, генератор плазмы. Генератор оборудован устройством согласования, которое необходимо для максимального увеличения падающей мощности и минимизации отраженной. Индуктор в виде плоской спирали, создаёт высокочастотное (ВЧ) магнитное поле в пространстве перед рабочей поверхностью устройства. В рабочую камеру подаётся газ до необходимого давления. В результате столкновительных процессов между электронами и атомами происходит ионизация рабочей атмосферы. Плазма создаётся путём инициации и поддержания индукционного высокочастотного разряда в рабочем газе под действием переменного ВЧ магнитного поля. Частота генератора 13, 56 МГц. Из-за наличия устройства согласования данный тип генератора более дорогой, чем НЧ, и менее надежный. Однако у него есть важное преимущество — способность создавать «мягкую» плазму, которая не повреждает даже чувствительные элементы на обрабатываемых образцах (например, открытые кристаллы на микросборках или легированные области в полупроводниковых пластинах) [28].

Таблица 2.1 - Технические характеристики устройства РПГ-128

| Параметр | Значение |
|--|----------|
| 1. Частота генератора для возбуждения, МГц | 13,56 |
| 2. Максимальная подводимая ВЧ мощность, Вт | 1500 |
| 3. Минимальная ВЧ мощность, Вт | 300 |
| 4. Диапазон рабочих давлений, Па | 0,1-10 |

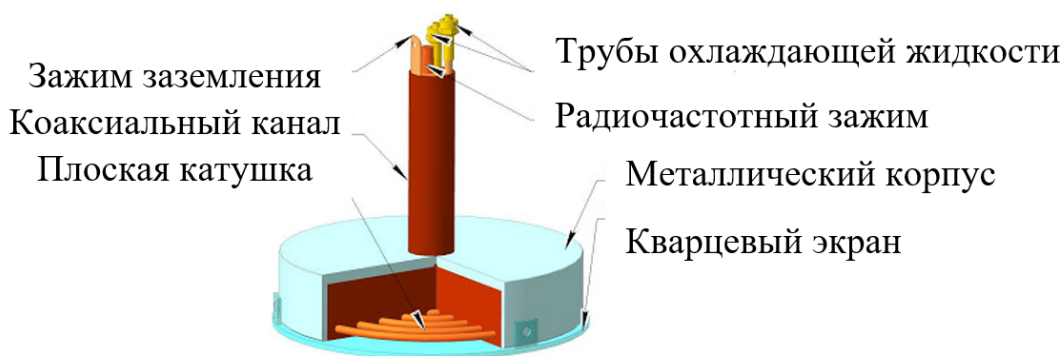


Рисунок 2.4 – Вид радиочастотного плазменного генератора в разрезе.

Процесс травления

Начинаем процесс травления уже при высоком вакууме в камере:

1. Включаем воду на ВЧ антенну и блок питания (канал 2);
2. Открываем баллоны аргона и водорода, включаем подачу аргона (50-70 %), устанавливаем режим расхода водорода (значение равное 8%), затем открываем 4 клапана (VE1, VE2, VE4, VE5);
3. Включаем антенну (значение мощности антенны устанавливаем ~500 Вт), включаем подачу смещения (-30 В). Ждем согласования;
4. Затем увеличиваем мощность то 800 Вт, уменьшаем поток аргона с шагом 5% до 15-25%, травление происходит в течение 10 мин.

2.4 Оптоволоконный спектрометр AvaSpec-2048x14-USB2

Для проведения спектрального анализа излучения, испускаемого плазмой, использовался оптоволоконный спектрометр AvaSpec-2048x14-USB2 с высокой чувствительностью. Схема оптико-эмиссионного спектрального анализа плазмы представлена на рисунке 2.5.

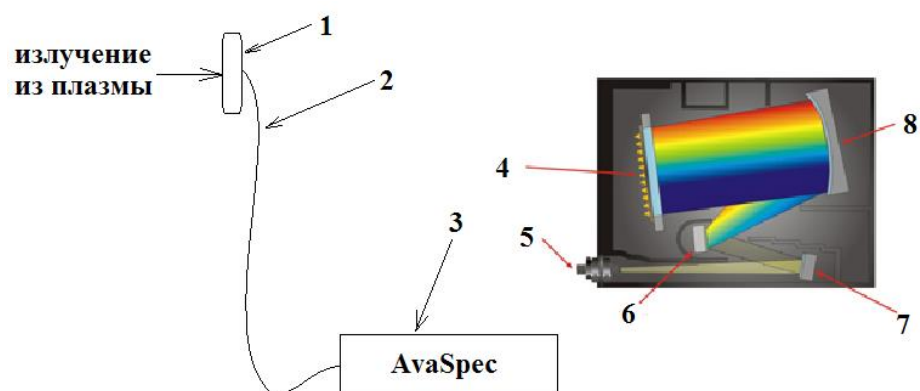


Рисунок 2.5 – Схема спектральной диагностики: 1 – коллимационная линза; 2 – оптоволоконный кабель; 3 – спектрометр; 4 – CCD-детектор; 5 – вход оптической скамьи; 6 – дифракционная решетка; 7, 8 – сферические зеркала.

В нашем случае схема эксперимента выглядела следующим образом:



Рисунок 2.6 – Схема спектральной диагностики

Излучение плазмы из вакуумной камеры попадает на кварцевый датчик и, проходя фокусирующую коллимационную линзу, по оптоволоконному кабелю попадает на вход спектрометра. Далее приходит на вход оптической

скамьи Ava Bench с фокусным расстоянием 75 мм (ширина входной щели 10 мкм), после чего коллимируется сферическим зеркалом. Плоская дифракционная решетка отбрасывает диспергированные пучки света на второе сферическое зеркало, которое фокусирует полосу результирующего спектра на светочувствительную зону многоэлементного CCD-детектора, состоящего из массива 2048x14 элементов. Для подавления волн второго порядка на поверхности детектора находится пленочное покрытие, состоящее из двух пропускных фильтров (350 и 590 нм). Далее профиль спектрального распределения с CCD-детекторной матрицы снимается управляемой микропроцессором электронной платой спектрометра и по USB-2 интерфейсу передается на персональный компьютер, где производится его обработка посредством программного обеспечения AvaSoft. Диапазон измерений спектрометра составляет $200 \div 1160$ нм при спектральном разрешении 0,8 нм.

2.5 Измерение толщины покрытий

Для определения толщины покрытий использовался прибор Calotest CAT-S0000 (CSEM, Швейцария), изображенный на рис. 2.7. Он позволяет измерять толщины различных покрытий в диапазоне от 0,1 до 50 мкм с точностью $\pm 3\%$ [29]. Время анализа не превышает нескольких минут.



Рисунок 2.7 – Внешний вид прибора CalotestCat-S-0000

Измерение осуществляется следующим образом (рис. 2.8). Образец закрепляется на столике, на него устанавливается калиброванный шар радиусом 1,5 сантиметра.

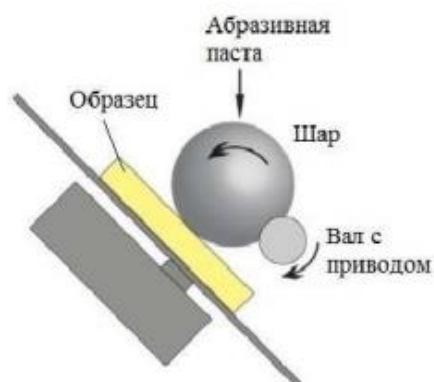


Рисунок 2.10 – Схема устройства измерения толщины плёнок

При вращении вала вокруг своей оси, шар, с добавленным на его поверхность абразивом вращаясь по неподвижной поверхности образца оставляет сферический шлиф, который затем анализируется при помощи оптического микроскопа. Типичная схема показана на рисунке 2.9.

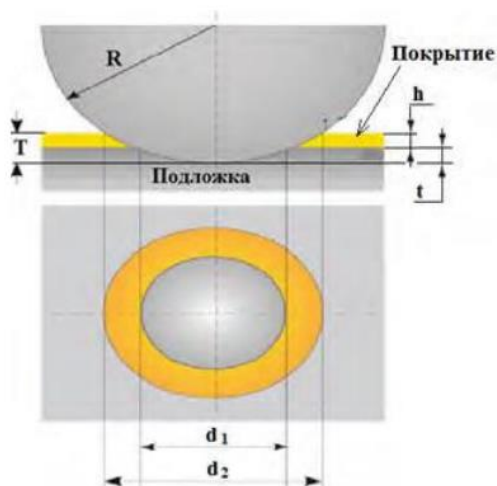


Рисунок 2.9 – Изображение сферического шлифа: R – радиус шара, T – глубина сферического кратера, t – глубина кратера в материале подложке, h – толщина покрытия

Расчёт толщины покрытия ведется следующим образом:

$$h = T - t, \quad (2.1)$$

где T – глубина сферического кратера, t – глубина кратера в материале подложки, которые рассчитываются как:

$$t = R - \left(\frac{1}{2} \sqrt{4R^2 - d_2^2} \right) \quad (2.2)$$

$$t = R - \left(\frac{1}{2} \sqrt{4R^2 - d_1^2} \right) \quad (2.3)$$

Тогда уравнение (5) примет вид:

$$h = \frac{1}{2} \left(\sqrt{4R^2 - d_2^2} - \sqrt{4R^2 - d_1^2} \right) \quad (2.4)$$

2.6 Оптическая эмиссионная спектроскопия тлеющего разряда GDOES

Тлеющий разряд оптикоэмиссионного спектрометра инициируются в разрядном промежутке между двумя электродами заполненным инертным газом. Электроны движутся от катода к аноду и ионизируют нейтральные атомы газа. Положительные ионы, в свою очередь, перемещаются к катоду и выбивают из его поверхности атомы, которые попадают в плазму, где они возбуждаются при столкновении с электронами или другими метастабильными атомами газа. Затем метастабильные атомы материала катода могут возвращаться в стабильное состояние, понижая свою избыточную энергию за счет испускания излучения.

За счёт того, что фотоны, испускаемые атомами, имеют определенную длину волны, эмиссионный спектрометр способен измеряя интенсивность сигналов на излучаемых длинах волн даёт информацию о количестве атомов каждого типа, поступающих на катод. В процессе распыления катода возникает оптический сигнал, пропорциональный составу распыленного материала. На рисунке 2.10 представлена типичная схема такого процесса.

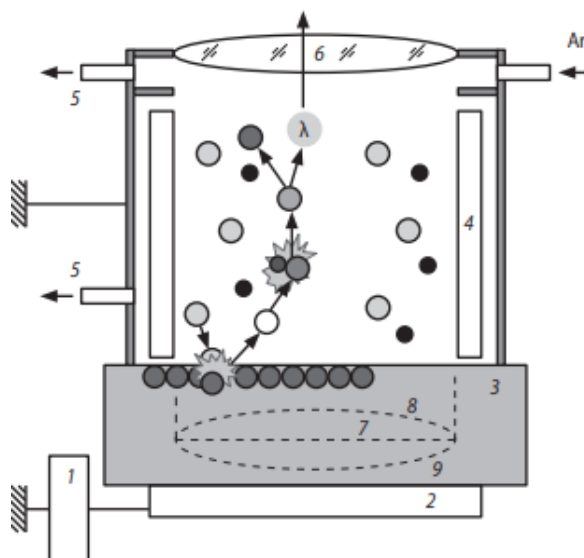


Рисунок 2.10 – Типичная схема разрядного промежутка 1 – источник питания (ИП), 2 – водоохлаждаемый токоподвод, 3 – образец, 4 – анод, 5 – система откачки, 6 – линза, 7 – идеальная форма вытравливаемого кратера, 8 и 9 – неоптимальная геометрия кратера [17]

Основными параметрами для управления тлеющим разрядом являются общая мощность, рабочее давление, «модуль» и «фаза» (емкости конденсаторов). Метод GDOES – разрушающий: в ходе анализа образца на его поверхности происходит вытравливание кратера, диаметр которого соответствует диаметру анода (обычно 4 мм). Перечисленные параметры разряда подбираются таким образом, чтобы обеспечить равномерное вытравливание по площади, получить плоское дно кратера, что позволяет увеличить точность анализа и разрешение по глубине. Кроме того, параметры разряда подбираются отдельно, в зависимости от физикохимических характеристик образца для анализа: объемных образцов сталей и сплавов, тонких и толстых проводящих и полупроводниковых покрытий, стекол и непроводящей керамики, полимеров и т. д. Вторым основным узлом оптического эмиссионного спектрометра тлеющего разряда является собственно спектрометр, схема которого показана на рисунке 2.11. Излучение, генерируемое плазмой в разрядном промежутке, через линзу передается на дифракционную решетку, где

оно раскладывается по длинам волн. По периметру полихроматора в различных положениях, в зависимости от длины волны, установлены щели и детекторы, фиксирующие интенсивность излучения.

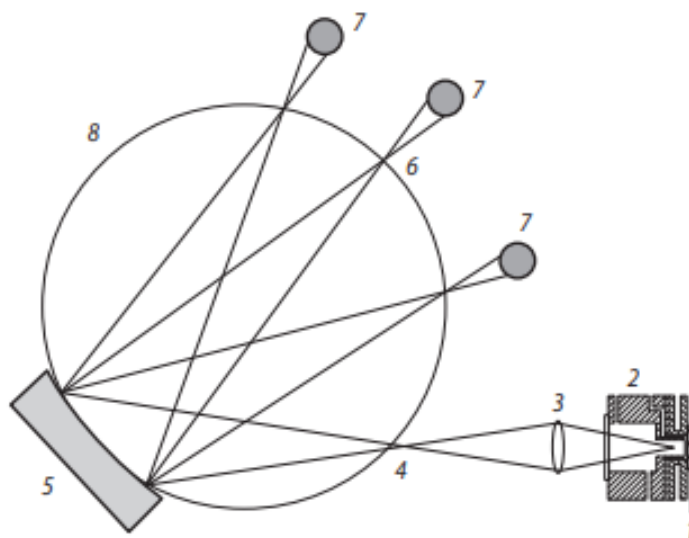


Рисунок 2.11 – Схема оптического спектрометра 1 – образец, 2 – разрядный промежуток, 3 – линза, 4 – входная щель полихроматора, 5 – дифракционная решетка, 6 – выходная щель, 7 – детектор, 8 – полихроматор

Измерение происходит следующим образом [17]:

1. Исследуемый образец помещается в рабочий объем спектрометра. Откачивается вакуум (~ 8 Па), после чего в камеру напускается аргон особой чистоты (99,9999%) до давления 500-850 Па.

2. При подаче разности потенциалов на электроды формируется тлеющий разряд, ионы которого распыляют поверхность исследуемого образца.

3. Эмитируемые атомы из образца испускают кванты света, которые регистрируются оптической системой и далее расшифровываются с помощью базы данных.

4 Финансовый менеджмент, ресурсосбережение и ресурсоэффективность

Введение

Выполнение раздела «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение» несет в себе цель выполнить комплексное описание и анализ финансово-экономических аспектов проекта. Необходимо оценить полные денежные затраты на проект, а также дать хотя бы приближенную экономическую оценку результатов его внедрения. Это в свою очередь позволит с помощью традиционных показателей эффективности инвестиций оценить экономическую целесообразность осуществления работы.

Для достижения цели необходимо решить следующие задачи:

- Оценка коммерческого потенциала разработки;
- Планирование научно-исследовательской работы;
- Расчет стоимости научно-исследовательской работы;
- Определение ресурсной, финансовой, бюджетной эффективности исследования.

Цель работы – получение данных о травлении углеродных покрытий в плазме высокочастотного разряда в среде $\text{Ar}+\text{H}_2$.

4.1 Оценка коммерческого потенциала и перспективности проведения научных исследований с позиции ресурсоэффективности и ресурсосбережения

4.1.1 Потенциальные потребители результатов исследования

Работа посвящена технологии травления углеродных покрытий при использовании плазмы высокочастотного разряда в аргон – водородной среде с

использование индуктивно – связанного источника. Использование индуктивно – связанного источника плазмы позволяет управлять большим количеством рабочих параметров процесса травления покрытий. Новизна разработки состоит в использовании аргон – водородной плазмы созданной с помощью ВЧ – источника для травления плёнок углерода.

Углеродное покрытие – представляет собой комбинацию алмазных (sp^3) и графитоподобных (sp^2) связей. Удаление приповерхностного слоя в твердых телах имеет важное технологическое значение в различных отраслях промышленности начиная от машиностроения и заканчивая микроэлектроникой. Существует два основных вида травления твердых тел: жидкостное и «сухое». Жидкостное травление представляет собой комбинации различных химических растворов в зависимости от удаляемого покрытия. «Сухое» подразделяется на: ионное, ионно – химическое и плазмохимическое. Из – за химической инертности углеродного покрытия, жидкостной метод травления не подходит для данных покрытий, а ионное и ионно – химическое имеет большую долю физического распыления, что является негативным фактором для исходной морфологии поверхности. Поэтому основным методом для травления углеродных плёнок был выбран плазмохимический метод основанный на создании аргон – водородной плазмы с помощью ВЧ – источника. Основным преимуществом такого метода является независимое управление параметрами плазмы. Еще одно преимущество заключается в чистоте процесса, за счёт того, что метод является – безэлектродным. Основной принцип технологии травления углеродных плёнок заключается в образовании частиц, обладающих повышенной химической активностью - свободные атомы и радикалы, ионы, возбужденные состояния атомов и молекул. Химические реакции этих частиц с поверхностью обрабатываемого материала, сопровождающиеся образованием летучих продуктов, и представляют собой процесс плазмохимического травления. Данная методика травления плёнок в первую очередь интересна для промышленного применения так, как сохранение исходного профиля

поверхности и возможность эффективного удаления углеродных пленок является актуальной задачей.

Целевой рынок – любое производство, связанное с технологиями тонких плёнок.

4.1.2 Анализ конкурентных технических решений

Анализ конкурентных решений целесообразно проводить при помощи оценочной карты, для этого были определены 2 конкурента на рынке: технология реактивного ионного травления (B_1), технология ионно – плазменного травления (B_2).

Расчет показателя конкурентоспособности производился по следующей формуле:

$$K = \sum_i B_i \cdot B_i, \quad (4.1)$$

где B_i – бал i -го показателя, B_i – вес показателя (в долях единицы).

Таблица 4.1 – Оценочная карта для сравнения конкурентных технических решений (разработок)

| Критерии оценки | Вес критерия | Баллы | | | Конкурентоспособность | | |
|---|--------------|------------|----------------|----------------|-----------------------|----------------|----------------|
| | | B_{ϕ} | $B_{\kappa 1}$ | $B_{\kappa 2}$ | K_{ϕ} | $K_{\kappa 1}$ | $K_{\kappa 2}$ |
| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 |
| Технические критерии оценки ресурсоэффективности | | | | | | | |
| 1. Производительность | 0,25 | 4 | 5 | 2 | 1,0 | 1,25 | 0,5 |
| 2. Надёжность | 0,1 | 4 | 3 | 4 | 0,4 | 0,3 | 0,4 |
| 3. Простота методики получения покрытий | 0,1 | 5 | 3 | 5 | 0,5 | 0,3 | 0,5 |
| 4. Качество покрытий | 0,2 | 5 | 3 | 4 | 1,0 | 0,6 | 0,8 |
| 5. Возможность автоматизации | 0,1 | 5 | 3 | 5 | 0,5 | 0,3 | 0,5 |
| Экономические критерии оценки ресурсоэффективности | | | | | | | |
| 1. Конкурентоспособность продукта | 0,05 | 5 | 3 | 4 | 0,25 | 0,15 | 0,2 |
| 2. Уровень проникновения на рынок | 0,04 | 4 | 3 | 5 | 0,16 | 0,12 | 0,2 |
| 3. Стоимость технологии | 0,06 | 4 | 4 | 4 | 0,24 | 0,24 | 0,24 |
| 4. Предполагаемый срок эксплуатации | 0,05 | 5 | 5 | 5 | 0,25 | 0,25 | 0,25 |
| 5. Послепродажное обслуживание | 0,05 | 5 | 3 | 5 | 0,25 | 0,15 | 0,25 |
| Итого | 1 | 46 | 35 | 43 | 4,55 | 3,66 | 3,84 |

Согласно вышеприведенному расчету видно, что предлагаемая нами технология травления покрытий имеет более высокий показатель конкурентоспособности (4,55). Это обусловлено следующим рядом факторов: технология компактна и безопасна, проста в эксплуатации и надёжна, а также имеет высокую производительность.

4.2 SWOT-анализ

SWOT – Strengths (сильные стороны), Weaknesses (слабые стороны), Opportunities (возможности) и Threats (угрозы) – представляет собой комплексный анализ научно-исследовательского проекта. Результаты исследования приведены в SWOT-анализ (таблица 4.2).

Таблица 4.2 – SWOT-анализ.

| | | |
|--|---|--|
| | Сильные стороны научно-исследовательского проекта: С1. Высокая производительность технологии; С2. Высокая повторяемость результатов; С3. Простая методика удаления покрытий; | Слабые стороны научно-исследовательского проекта: Сл1. Недостаточная инструментальная база для проведения измерений; Сл2. Использование устаревшего оборудования для исследования; Сл3. Отсутствие достаточного финансирования проекта. |
| Возможности: В1. Использование инновационной структуры ТПУ; В2. Повышение стоимости конкурентных разработок | 1. Получение технологии исследований 2. Продвижение НТИ на рынок | 1 Поиск дополнительного финансирования в виде грантов и др. 2. Повышение квалификации кадров у потенциальных потребителей 3. Приобретения необходимого оборудования либо использование инновационной инфраструктуры ТПУ |
| Угрозы: У1. Отсутствие спроса на технологию; У2. Введение дополнительных | 1. Продвижение технологии с целью создания спроса 2. Сертификация и стандартизация технологии | 1. Приобретение необходимого оборудования либо использование инновационной инфраструктуры ТПУ 2. Продвижение |

| | | |
|---|--|------------------------------------|
| государственных требований к сертификации технологии. | | технологии с целью создания спроса |
|---|--|------------------------------------|

4.3 Планирование научно-исследовательских работ

4.3.1 Структура работ в рамках научного исследования

Комплекс предполагаемых работ включает в себя следующие задачи:

- определить структуру работ в рамках исследования;
- определить участников каждой работы;
- установить продолжительность работ;

Работа выполнялась студентом (инженер) под руководством научного руководителя (таблица 4.3).

Таблица 4.3 – Список производимых задач и работ и их исполнители

| Основные этапы | № | Содержание работ | Должность |
|--|----|--|-----------------------|
| Разработка технического задания | 1 | Составление и утверждение технического задания | Руководитель |
| Выбор направления исследований | 2 | Выбор направления исследований и способа решения задач | Руководитель |
| | 3 | Подбор и изучение материалов по теме | Инженер |
| Теоретические и экспериментальные исследования | 4 | Составление плана экспериментов | Руководитель, инженер |
| | 5 | Подготовка образцов для экспериментов | Инженер |
| | 6 | Проведение экспериментальных работ | Руководитель, Инженер |
| | 7 | Выполнение расчётов | Инженер |
| Обобщение и оценка результатов | 8 | Анализ и обработка полученных результатов | Инженер |
| | 9 | Обсуждение и оценка эффективности результатов | Руководитель, Инженер |
| Оформление отчета по НИР | 10 | Составление пояснительной записки | Инженер |
| | 11 | Подготовка к защите | Инженер |

4.3.2 Определение трудоемкости выполнения работ

Основная часть стоимости разработки проекта составляется из трудовых затрат, поэтому важно определить трудоемкость работ всех участников разработки проекта.

Несмотря на то, что трудоемкость зависит от трудно учитываемых параметров, т.е. носит вероятностный характер, ее можно определить экспертным путем, в «человеко-днях». Ожидаемое (среднее) значение трудоемкости $t_{ожсi}$ определяется по формуле:

$$t_{ожсi} = \frac{3t_{минi} + 2t_{максi}}{5}, \quad (4.2)$$

где $t_{минi}$ – минимально возможное время выполнения поставленной задачи исполнителем (является оптимистичной оценкой: при удачном стечении обстоятельств), чел.-дн.; $t_{максi}$ – максимально возможное время выполнения поставленной задачи исполнителем (является пессимистичной оценкой: при неудачном стечении обстоятельств, чел.-дн.

На основании расчетов ожидаемой трудоемкости работ, необходимо определить продолжительность каждой работы в рабочих днях T_p :

$$T_{pi} = \frac{t_{ожсi}}{Ч_i}, \quad (4.3)$$

Где $Ч_i$ – количество исполнителей, одновременно выполняющих поставленную задачу, чел.

По всем работам результаты расчета продолжительности в рабочих днях представлены в таблице 4.4.

4.3.3 Разработка графика проведения исследования

Диаграмма Ганта является наиболее удобным и наглядным способом представления графика проведения работ и представляет собой отрезки,

размещенные на горизонтальной шкале времени. Каждый отрезок соответствует отдельной задаче или подзадаче. Начало, конец и длина отрезка на шкале времени соответствуют началу, концу и длительности задачи.

Для построения графика Ганта длительность каждой из выполняемых работ из рабочих дней переводились в календарные дни по формуле:

$$T_{ki.рук} = T_{pi} \cdot k_{кал}, \quad (4.4)$$

$$T_{ki.инж} = T_{pi} \cdot k_{кал}, \quad (4.5)$$

где $k_{кал}$ – календарный коэффициент.

Для каждого исполнителя расчеты производились индивидуально. Календарный коэффициент определялся по формуле:

$$k_{кал} = \frac{T_{кал}}{T_{кал} - T_{вых} - T_{пр}}, \quad (4.6)$$

где $T_{кал}$ – общее количество календарных дней в году; $T_{кал}$ – общее количество выходных дней в году; $T_{пр}$ – общее количество праздничных дней в году.

Расчет трудоемкости и продолжительности работ, на примере задачи «Составление и утверждение технического задания»:

$$t_{ож\ i} = \frac{3t_{min\ i} + 2t_{max\ i}}{5} = \frac{3 \cdot 2 + 2 \cdot 4}{5} = 2,8 \text{ чел.} - \text{дн.}, \quad (4.7)$$

$$T_{pi} = \frac{t_{ож\ i}}{C_i} = \frac{2,8}{1} = 2,8 \text{ раб.дн.} \quad (4.8)$$

Расчет календарного коэффициента для пятидневной рабочей недели (рабочая неделя инженера):

$$k_{кал} = \frac{T_{кал}}{T_{кал} - T_{вых} - T_{пр}} = \frac{365}{365 - 104 - 14} = 1,48. \quad (4.9)$$

Расчет календарной продолжительности выполнения работы, на примере задачи «Выбор направления исследований»:



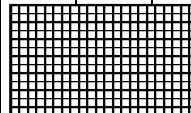









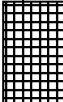

$$T_{ki.рук} = T_{pi} \cdot k_{кал} = 2,8 \cdot 1,48 = 4,144 \approx 4 \text{ кал. дн.} \quad (4.10)$$

Все полученные значения в календарных днях округлялись до целого числа. Результаты представлены в таблице 4.4

Таблица 4.4. Временные показатели проектирования

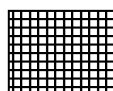
| Название работы | Трудоёмкость | | | | | | Длит-сть в рабочих днях, T_{pi} | | Длит-сть в календа рных днях, T_{ki} | |
|---|--------------------------|---------|--------------------------|---------|------------------------|---------|---|---------|---|---------|
| | t_{min} , чел.- дн. | | t_{max} , чел.- дн. | | $t_{ож}$, чел.-дн. | | | | | |
| | Руковод. | Инженер | Руковод. | Инженер | Руковод. | Инженер | Руковод. | Инженер | Руковод. | Инженер |
| Составление и утверждение технического задания | 2 | - | 4 | - | 2,8 | - | 2,8 | - | 4 | - |
| Выбор направления исследований и способа решения задач | 2 | - | 4 | - | 2,8 | - | 2,8 | - | 4 | - |
| Подбор и изучение материалов по теме | - | 21 | - | 28 | - | 23,8 | - | 23,8 | - | 35 |
| Составление плана экспериментов | 4 | 4 | 7 | 7 | 5,2 | 5,2 | 2,6 | 2,6 | 4 | 4 |
| Подготовка образцов для экспериментов | - | 3 | - | 5 | - | 3,8 | - | 3,8 | - | 7 |
| Проведение экспериментальных работ | 14 | 24 | 20 | 34 | 16,4 | 28 | 8,2 | 14 | 12 | 21 |
| Выполнение расчетов | - | 7 | - | 10 | - | 8,2 | - | 8,2 | - | 12 |
| Анализ и обработка полученных результатов | - | 5 | - | 8 | - | 6,2 | - | 6,2 | - | 9 |
| Обсуждение и оценка эффективности результатов | 5 | 6 | 7 | 9 | 5,8 | 7,2 | 2,9 | 3,6 | 4 | 5 |
| Составление пояснительной записки | - | 3 | - | 6 | - | 4,2 | - | 4,2 | - | 6 |
| Подготовка к защите | - | 4 | - | 6 | - | 4,8 | - | 4,8 | - | 7 |

Таблица 4.5. Календарный план-график проведения НИОКР по теме

| № работ | Вид работ | Исполнители | T_{ki} , кал. Дн. | Продолжительность выполнения работ | | | | | | | |
|---------|--|-----------------------|---------------------|--|--|--|---|---|--|---|---|
| | | | | февр | | март | | апр | | май | |
| | | | | 1 | 2 | 1 | 2 | 1 | 2 | 1 | 2 |
| 1 | Составление и утверждение технического задания | Руководитель | 4 |  | | | | | | | |
| 2 | Выбор направления исследований и способа решения задач | Руководитель | 4 |  | | | | | | | |
| 3 | Подбор и изучение материалов по теме | Инженер | 35 |  | | | | | | | |
| 4 | Составление плана экспериментов | Руководитель, инженер | 4 | |   | | | | | | |
| 5. | Подготовка образцов для экспериментов | Инженер | 7 | |  | | | | | | |
| 6. | Проведение экспериментальных работ | Руководитель, Инженер | 21 | | |   | | | | | |
| 7. | Выполнение расчетов | Инженер | 12 | | | | |  | | | |
| 8. | Анализ и обработка полученных результатов | Инженер | 9 | | | | |  | | | |
| 9. | Обсуждение и оценка эффективности результатов | Руководитель, Инженер | 5 | | | | | |   | | |
| 10. | Составление пояснительной записки | Инженер | 6 | | | | | | |  | |
| 11. | Подготовка к защите | Инженер | 7 | | | | | | | |  |



– руководитель;



– инженер.

В результате выполнения подраздела был разработан план-график выполнения этапов работ для руководителя и инженера, позволяющий оценить и спланировать рабочее время исполнителей.

4.4 Бюджет научно-технического исследования

При планировании бюджета НИ должно быть обеспечено полное и достоверное отражение всех видов расходов, связанных с его выполнением.

4.4.1 Расчет материальных затрат НТИ

В эту статью включаются затраты на приобретение всех видов материалов, комплектующих изделий и полуфабрикатов, необходимых для выполнения работ по данной теме. Количество потребных материальных ценностей определяется по нормам расхода.

Также в стоимость материальных затрат включают транспортно-заготовительные расходы (3 – 5 % от цены).

Таблица 4.6 – Сырье, материалы и комплектующие изделия.

| Наименование | Марка, размер | Кол-во | Цена за единицу, руб. | Сумма, руб. |
|--|-------------------------|--------|-----------------------|--------------|
| Баллон Водорода | H ₂ , 99,99% | 1 | 13000 | 13000 |
| Баллон Аргон | Ar, 99,99% | 1 | 9000 | 9000 |
| Всего за материалы | | | | 22000 |
| Транспортно-заготовительные расходы (3–5%) | | | | 1760 |
| Итого по статье | | | | 23760 |

4.4.2 Расчет затрат на специальное оборудование для научных работ

При выполнении исследования дополнительное оборудование для проведения исследований не было приобретено. Все использованное оборудование являлось собственностью отделения экспериментальной физики

НИИ ТПУ. Необходимо рассчитать амортизационные отчисления для использованного оборудования.

Таблица 4.7 – Затраты на оборудование

| № | Наименование оборудования | Кол-во, шт. | Срок полезного использования, лет | Цены единицы оборудования, тыс. руб. | Общая стоимость оборудования, тыс. руб. |
|---------------|-------------------------------|-------------|-----------------------------------|--------------------------------------|---|
| 1 | ВЧ – генератор COMDEL CB 5000 | 1 | 7 | 1000 | 1000 |
| 2 | Генератор плазмы РПГ-128 | 1 | 10 | 2000 | 2000 |
| Итого: | | | | | 3000 тыс. руб. |

Расчет амортизации проводится следующим образом:

Норма амортизации:

$$H_A = \frac{1}{n}, \quad (4.11)$$

где n – срок полезного использования в количестве лет.

Амортизация:

$$A = \frac{H_A I}{12} \cdot m, \quad (4.12)$$

где I – итоговая сумма, тыс. руб.; m – время использования, мес.

Таким образом, для источника питания Applied Electronics APEL-M-5HIPIMS-1k амортизация будет составлять:

$$A = \frac{100000}{7 \cdot 12 \cdot 30} \cdot 2 = 793,65 \text{ руб.} \quad (4.13)$$

Сканирующий электронный микроскоп:

$$A = \frac{2000000}{10 \cdot 12 \cdot 30} \cdot 1 = 555,55 \text{ руб.} \quad (4.14)$$

Суммарные затраты амортизированных отчислений:

$$A = 793,65 + 555,55 = 1349,2 \text{ руб.} \quad (4.15)$$

4.5 Основная заработная плата исполнителей темы

В данном разделе рассчитывается заработная плата инженера и руководителя, помимо этого необходимо рассчитать расходы по заработной плате, определяемые трудоемкостью проекта и действующей системой оклада.

Основная заработная плата $Z_{осн}$ одного работника рассчитывается по следующей формуле:

$$Z_{осн} = Z_{дн} \cdot T_p, \quad (4.16)$$

где $Z_{дн}$ – среднедневная заработная плата, руб.; T_p – продолжительность работ, выполняемых работником, раб.дн. (табл. 4.4).

Среднедневная заработная плата рассчитывается по формуле:

$$Z_{дн} = \frac{Z_m \cdot M}{F_d}, \quad (4.17)$$

где Z_m – месячный должностной оклад работника, руб.; M – количество месяцев работы без отпуска в течение года; при отпуске в 24 раб. дней $M = 11,2$ месяца, 5-дневная неделя; F_d – действительный годовой фонд рабочего времени научно-технического персонала, раб. дн. (таблица 4.8)

Таблица 4.8. Баланс рабочего времени

| Показатели рабочего времени | Руководитель | Инженер |
|--|--------------|---------|
| Календарное число дней | 365 | 365 |
| Количество нерабочих дней | | |
| - выходные дни | 104 | 104 |
| - праздничные дни | 14 | 14 |
| Потери рабочего времени | | |
| - отпуск | 24 | 24 |
| - невыходы по болезни | | |
| Действительный годовой фонд рабочего времени | 223 | 223 |

Месячный должностной оклад работника:

$$Z_m = Z_{тс} \cdot (1 + k_{пр} + k_d) \cdot k_p, \quad (4.18)$$

где $Z_{тс}$ – заработная плата по тарифной ставке, руб.; $k_{пр}$ – премиальный коэффициент, равный 0,3 (т.е. 30% от $Z_{тс}$); k_d – коэффициент доплат и надбавок составляет примерно 0,2 – 0,5; k_p – районный коэффициент, равный 1,3 (для Томской области).

Расчёт основной заработной платы приведён в таблице 4.9.

Таблица 4.9 - Расчёт основной заработной платы

| Исполнители | $Z_{тс}$, руб. | $k_{пр}$ | $k_{д}$ | $k_{р}$ | $Z_{м}$, руб. | $Z_{дн}$, руб. | $T_{р,}$ раб. дн. | $Z_{осн}$, руб. |
|-----------------------------------|--------------------|----------|---------|---------|-------------------|--------------------|-------------------------|---------------------|
| Руководитель | 24960 | 0,3 | 0,3 | 1,3 | 51917 | 2608 | 33 | 86064 |
| Инженер | 12664 | 0,3 | 0,3 | 1,3 | 26341 | 1323 | 91 | 120393 |
| Итого $Z_{осн}$ | | | | | | | | 206457 |

4.5.1 Дополнительная заработная плата исполнителей темы

Дополнительная заработная плата рассчитывается исходя из 10–15% от основной заработной платы, работников, непосредственно участвующих в выполнении темы.

Таким образом, сумма основной заработной платы участников проекта и дополнительной будет составлять статью затрат расходов на зарплату:

$$Z_{зп} = Z_{осн} + Z_{доп}, \quad (4.19)$$

где $Z_{осн}$ – основная заработная плата, руб., $Z_{доп}$ – дополнительная заработная плата, по следующей формуле:

$$Z_{доп} = k_{доп} \cdot Z_{осн}, \quad (4.20)$$

где $k_{доп}$ – коэффициент дополнительной заработной платы (на стадии проектирования принимаем равным 0,15).

Таблица 4.10 – Заработная плата исполнителей НТИ

| Исполнитель | Руководитель | Инженер |
|-------------------------------|--------------|----------|
| Основная зарплата, руб. | 86064,0 | 120393,0 |
| Дополнительная зарплата, руб. | 12909,6 | 15358,9 |
| Суммарная зарплата, руб. | 98973,6 | 135751,9 |
| Итого по статье, руб | 234725,5 | |

4.6 Отчисления во внебюджетные фонды (страховые отчисления)

Отчисления во внебюджетные фонды (таблица 4.11) определяется по формуле:

$$З_{внеб} = k_{внеб} \cdot (З_{осн} + З_{доп}), \quad (4.21)$$

где $k_{внеб}$ – коэффициент отчислений на уплату во внебюджетные фонды (пенсионный фонд, фонд ОМС и социальное страхование). Общая ставка взносов составляет в 2020 году – 30% (ст. 425, 426 НК РФ).

Таблица 4.11– Отчисления во внебюджетные фонды

| Исполнитель | Суммарная зарплата, руб. | Отчисления во внебюджетные фонды |
|--------------|--------------------------|----------------------------------|
| Руководитель | 98973,6 | 29692,1 |
| Инженер | 135751,9 | 40725,6 |
| Итого: | | 70417,7 |

4.7 Накладные расходы

Накладные расходы учитывают прочие затраты организации, не попавшие в предыдущие статьи расходов: печать и ксерокопирование материалов исследования, оплата услуг связи, электроэнергии, почтовые и телеграфные расходы, размножение материалов и т.д. Их величина определяется по следующей формуле:

$$З_{накл} = \text{сумма статей} \cdot k_{нр} \quad (4.22)$$

где $k_{нр}$ – коэффициент, учитывающий накладные расходы. Величину коэффициента накладных расходов можно взять в размере 16%.

$$З_{накл} = (23760 + 1706 + 206457 + 434726 + 70418) \cdot 0,16 = 117930,7 \text{ руб.} \quad (4.23)$$

4.8 Формирование бюджета затрат научно-исследовательского проекта

Рассчитанная величина затрат научно-исследовательской работы по теме: «Травление углеродных плёнок с помощью индуктивно – связанного источника плазмы», является основой для формирования бюджета затрат проекта, который

при формировании договора с заказчиком защищается научной организацией в качестве нижнего предела затрат на разработку научно-технической продукции.

Определение бюджета затрат на научно-исследовательский проект по каждому варианту исполнения приведен в таблице 4.12.

Таблица 4.12 – Рассчитанный бюджет затрат НИИ

| Наименование статьи | Сумма, руб. |
|--|---------------|
| Материальные затраты НИИ | 23760 |
| Амортизация оборудования | 1349 |
| Затраты по основной заработной плате исполнителей темы | 206457 |
| Затраты по дополнительной заработной плате исполнителей темы | 234726 |
| Отчисления во внебюджетные фонды | 70418 |
| Накладные расходы | 117931 |
| Бюджет затрат НИ | 654641 |

4.9 Определение ресурсной (ресурсосберегающей) эффективности исследования

Интегральный показатель финансовой эффективности научного исследования получают в ходе оценки бюджета затрат трех (или более) вариантов исполнения научного исследования. Для этого наибольший интегральный показатель реализации технической задачи принимается за базу расчета (как знаменатель), с которым соотносятся финансовые значения по всем вариантам исполнения.

В качестве вариантов исполнения были выбраны ближайшие аналоги травления углеродных плёнок в плазме ВЧ - разряда ($\Phi_{p1}=654641$), реактивное ионное травление ($\Phi_{p6}=420000$) и ионно – плазменное травление ($\Phi_{p(=540000)}$).

Интегральный финансовый показатель разработки определяется как:

$$I_{\text{финр}}^{\text{исп.и}} = \frac{\Phi_{pi}}{\Phi_{\text{max}}}, \quad (4.24)$$

где $I_{\text{фин.р}}^{\text{исп.}i}$ – интегральный финансовый показатель разработки; Φ_{pi} – стоимость i -го варианта исполнения; Φ_{max} – максимальная стоимость исполнения научно-исследовательского проекта.

$$I_{\text{фин.р}}^{\text{исп.1}} = \frac{\Phi_{p1}}{\Phi_{\text{max}}} = \frac{654996}{654641} = 1; \quad (4.25)$$

$$I_{\text{фин.р}}^{\text{исп.2}} = \frac{\Phi_{p2}}{\Phi_{\text{max}}} = \frac{420000}{654641} = 0,71; \quad (4.26)$$

$$I_{\text{фин.р}}^{\text{исп.3}} = \frac{\Phi_{p3}}{\Phi_{\text{max}}} = \frac{540000}{654641} = 0,82. \quad (4.27)$$

Полученная величина интегрального финансового показателя разработки отражает соответствующее численное увеличение бюджета затрат разработки в размах (значение больше единицы), либо соответствующее численное удешевление стоимости разработки в размах (значение меньше единицы, но больше нуля).

Интегральный показатель ресурсоэффективности

Оценка ресурсоэффективности проекта определялась посредством расчета интегрального критерия по формуле:

$$I_{pi} = \sum \alpha_i \cdot b_i, \quad (4.28)$$

где: I_{pi} – интегральный показатель ресурсоэффективности; α_i – весовой коэффициент проекта; b_i – бальная оценка проекта, устанавливаемая опытным путем по выбранной шкале оценивания.

Расставляем бальные оценки и весовые коэффициенты в соответствии с приоритетом характеристик проекта, рассчитываем конечный интегральный показатель и сводим полученные результаты в таблицу 4.13.

Таблица 4.13 – Сравнительная оценка характеристик проекта

| Критерии | Весовой коэффициент | Травление в Ag+H ₂ плазме созданной ВЧ - источником | Ионно – плазменное травление | Реактивное ионное травление |
|----------------------------|---------------------|--|------------------------------|-----------------------------|
| Селективность | 0,25 | 5 | 3 | 4 |
| Равномерность процесса | 0,15 | 5 | 4 | 3 |
| Анизотропия | 0,15 | 3 | 4 | 3 |
| Скорость удаления покрытия | 0,2 | 4 | 3 | 5 |
| Безопасность использования | 0,13 | 4 | 2 | 4 |
| Надежность | 0,12 | 4 | 4 | 4 |
| Итого: | 1 | 4,25 | 3,29 | 3,9 |

Расчет интегрального показателя для разрабатываемого проекта:

$$I_{p-исп1} = 0,25*5 + 0,15*5 + 0,15*3 + 0,20*4 + 0,13*4 + 0,12*4 = 4,25; \quad (4.29)$$

$$I_{p-исп2} = 0,25*3 + 0,15*4 + 0,15*4 + 0,20*3 + 0,13*2 + 0,12*4 = 3,29; \quad (4.30)$$

$$I_{p-исп3} = 0,25*4 + 0,15*3 + 0,15*3 + 0,20*5 + 0,13*4 + 0,12*4 = 3,9. \quad (4.31)$$

Интегральный показатель эффективности вариантов исполнения разработки определяется на основании интегрального показателя ресурсоэффективности и интегрального финансового показателя по формуле:

$$I_{ип1} = \frac{I_{рисп1}}{I_{фин.р}} = 4,25. \quad (4.32)$$

Сравнение интегрального показателя эффективности вариантов исполнения разработки позволит определить сравнительную эффективность проекта и выбрать наиболее целесообразный вариант из предложенных (табл. 4.14). Сравнительная эффективность проекта ($\Theta_{ср}$):

$$\Theta_{ср} = \frac{I_{исп1}}{I_{исп2}} = \frac{3,29}{4,25} = 0,77. \quad (4.33)$$

Таблица 4.14 - Сводная таблица показателей оценки ресурсоэффективности

| № п/п | Показатели | Исп.1 | Исп.2 | Исп.3 |
|----------|---|-------|-------|-------|
| 1 | Интегральный финансовый показатель разработки | 1 | 0,71 | 0,82 |
| 2 | Интегральный показатель ресурсоэффективности разработки | 4,25 | 3,29 | 3,9 |
| 3 | Интегральный показатель эффективности | 4,25 | 4,63 | 4,76 |
| 4 | Сравнительная эффективность вариантов исполнения | 1 | 0,92 | 0,89 |

В результате выполнения изначально сформулированных целей раздела, можно сделать следующие выводы:

1. Результатом проведенного анализа конкурентных технических решений является выбор одного из вариантов реализации травления плёнок углерода, как наиболее предпочтительного и рационального, по сравнению с остальными;

2. Составлен бюджет проектирования, позволяющий оценить затраты на реализацию проекта, которые составляют 654641 руб;

3. По факту оценки эффективности ИР, можно сделать выводы:

3.1 Значение интегрального финансового показателя ИР составляет 1, что является показателем того, что ИР является финансово выгодной, по сравнению с аналогами;

3.2 Значение интегрального показателя ресурсоэффективности ИР составляет 4,25, по сравнению с 3,29 и 3,9;

3.3 Значение сравнительной эффективности ИР составляет 1, по сравнению с 0,92 и 0,89, и является наиболее высоким, что означает, что техническое решение, рассматриваемое в ИР, является наиболее эффективным вариантом исполнения.

Выводы по разделу «Финансовый менеджмент, ресурсосбережение и ресурсоэффективность»

Была проведена оценка коммерческого потенциала и перспективности научного исследования. Разработка была также рассмотрена с позиции ресурсоэффективности и ресурсосбережения в сравнении с существующими на рынке конкурентами. С помощью SWOT-анализа были определены сильные и слабые стороны проекта, а также изучены рыночные возможности и угрозы. Результатом анализа стала разработка стратегия использования внутренних ресурсов для эффективного пребывания поведения во внешней среде. Помимо этого, в данном разделе разработан поэтапный план проведения научно-исследовательских работ с привязкой к исполнителю. На основе этого плана был разработан график работы, спланирован бюджет проекта.

5 СОЦИАЛЬНАЯ ОТВЕТСТВЕННОСТЬ

Введение

В современных условиях одним из основных направлений коренного улучшения всей профилактической работы по снижению производственного травматизма и профессиональной заболеваемости является повсеместное внедрение комплексной системы управления охраной труда, то есть объединение разрозненных мероприятий в единую систему целенаправленных действий на всех уровнях и стадиях производственного процесса.

В основе законодательства Российской Федерации об охране труда лежит конституция Российской Федерации и трудовой кодекс Российской Федерации. Обязанности по обеспечению безопасных условий и охраны труда в организации возлагаются на работодателя. Согласно Федеральному закону от 17 июля 1999 г. №181–ФЗ "Об основах охраны труда в Российской Федерации" (с изменениями от 20 мая 2002 г., 10 января 2003 г., 9 мая, 26 декабря 2005 г.).

Настоящая магистерская диссертация посвящена травлению углеродных покрытий с помощью индуктивно – связанного источника плазмы. Исследование предполагает работу с высоким напряжением и различными газами. Объектом исследования являются плёнки углерода, а предметом исследования служат различные соотношения параметров травления.

Научно-технической базой для проведения исследований стала лаборатория научно-образовательного центра Б.П. Вейнберга.

5.1 Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности

5.1.1 Специальные (характерные для рабочей зоны исследователя) правовые нормы трудового законодательства

Весь персонал обязан знать и строго соблюдать правила техники безопасности. Обучение персонала технике безопасности и производственной санитарии состоит из вводного инструктажа, и инструктажа на рабочем месте ответственным лицом (ГОСТ 12.0.004-2015 ССБТ. Организация обучения безопасности труда. Общие положения).

Проверка знаний правил техники безопасности проводится квалификационной комиссией после обучения на рабочем месте. Проверяемому, присваивается соответствующая его знаниям и опыту работы квалификационная группа по технике безопасности и выдается специальное удостоверение.

К работе на лабораторной вакуумно-плазменной установке допускаются лица не моложе 18 лет, не имеющие медицинских противопоказаний, прошедшие вводный инструктаж и инструктаж по безопасности труда на рабочем месте. К самостоятельной работе допускаются работники после специального обучения и проверки знаний правил электробезопасности, приобретенных навыков и безопасных способов выполнения работы и имеющие не менее II группы по электробезопасности.

Повторная проверка знаний норм и правил электробезопасности, правил безопасной работы с химическими веществами проводится с работниками не реже 1 раза в 12 месяцев, повторный инструктаж на рабочем месте – не реже 1 раза в 3 месяца.

Проведение всех видов инструктажа должно оформляться в Журнале регистрации инструктажа установленного образца, с обязательными подписями получившего и проводившего инструктаж, с указанием даты проведения инструктажа, наименования и номеров инструкции на виды работ, по которым проводится инструктаж.

При введении в эксплуатацию нового оборудования сотрудники, которые будут работать на нем, должны пройти внеплановый инструктаж по правилам эксплуатации и безопасной работе на данном оборудовании (ГОСТ Р 12.1.019-2009 ССБТ. Электробезопасность. Общие требования и номенклатура видов защиты).

5.1.2 Организационные мероприятия при компоновке рабочей зоны исследователя

Рациональная планировка рабочего места предусматривает четкий порядок и постоянство размещения предметов, средств труда и документации. То, что требуется для выполнения работ чаще должно располагаться в зоне легкой досягаемости рабочего пространства, как показано на рисунке 5.1.

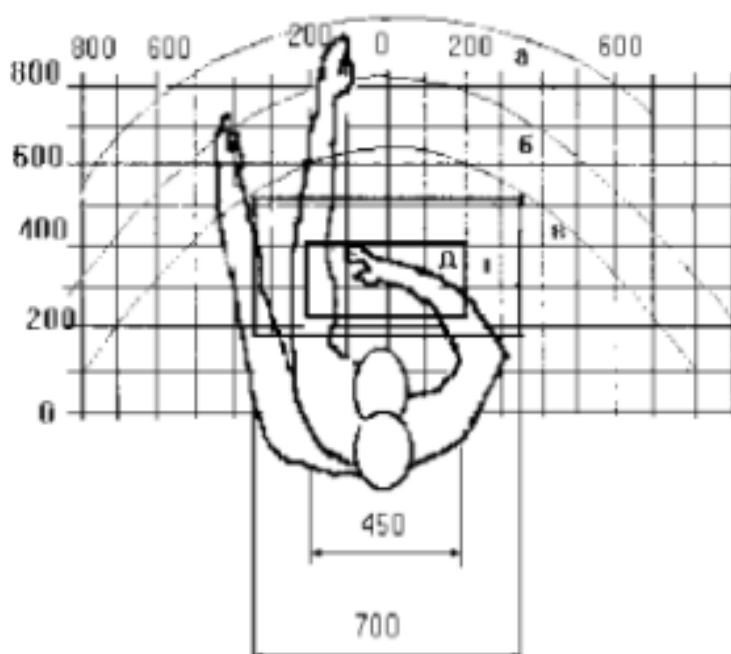


Рисунок 5.1 – Зоны досягаемости рук в горизонтальной плоскости: а – зона максимальной досягаемости рук; б – зона досягаемости пальцев при вытянутой руке – зона легкой досягаемости ладони; в – оптимальное пространство для грубой ручной работы; г – оптимальное пространство для тонкой ручной работы

Оптимальное размещение предметов труда и документации в зонах досягаемости рук: дисплей размещается в зоне а (в центре); клавиатура – в зоне г/д; системный блок размещается в зоне б (слева); принтер находится в зоне а (справа); документация – в зоне легкой досягаемости ладони – в (слева) – литература и документация, необходимая при работе; в выдвижных ящиках стола – литература, не используемая постоянно.

При проектировании письменного стола должны быть учтены следующие требования. Высота рабочей поверхности стола рекомендуется в пределах 680-800 мм. Высота рабочей поверхности, на которую устанавливается клавиатура, должна быть 650 мм. Рабочий стол должен быть шириной не менее 700 мм и длиной не менее 1400 мм. Должно иметься пространство для ног высотой не менее 600 мм, шириной – не менее 500 мм, глубиной на уровне колен – не менее 450 мм и на уровне вытянутых ног – не менее 650 мм.

Рабочее кресло должно быть подъёмно–поворотным и регулируемым по высоте и углам наклона сиденья и спинки, а также расстоянию спинки до переднего края сиденья. Рекомендуется высота сиденья над уровнем пола 420-550 мм. Конструкция рабочего кресла должна обеспечивать: ширину и глубину поверхности сиденья не менее 400 мм; поверхность сиденья с заглублённым передним краем. Монитор должен быть расположен на уровне глаз оператора на расстоянии 500-600 мм. Согласно нормам, угол наблюдения в горизонтальной плоскости должен быть не более 45 градусов к нормали экрана. Лучше если угол обзора будет составлять 30 градусов. Кроме того, должна быть возможность выбирать уровень контрастности и яркости изображения на экране [30].

Должна предусматриваться возможность регулирования экрана:

- по высоте +3 см;
- по наклону от 10 до 20 градусов относительно вертикали;
- в левом и правом направлениях.

5.2 Производственная безопасность

Производственные условия на рабочем месте характеризуются наличием опасных и вредных факторов, которые классифицируются по группам элементов: физические, химические, биологические, психофизиологические.

Таблица 5.1. Возможные опасные и вредные факторы

| Факторы (ГОСТ 12.0.003–2015) | Этапы работ | | | Нормативные документы |
|--|-------------|--------------|--------------|--|
| | Разработка | Изготовление | Исследование | |
| 1. Повышенный уровень шума | - | + | - | ГОСТ 12.1.029-80 «Система стандартов безопасности труда (ССБТ). Средства и методы защиты от шума. Классификация» [33]. |
| 2. Отклонение показателей микроклимата | + | + | + | СанПиН 2.2.4.548-96. Гигиенические требования к микроклимату производственных помещений; |
| 3. Недостаточная освещенность рабочей зоны | + | + | + | СанПин 23-05-95 Естественное и искусственное освещение; |
| 4. Пожаро- и взрывоопасность | | + | | Инструкция по охране труда при хранении и эксплуатации газовых баллонов [34]. |

5.3 Анализ опасных и вредных производственных факторов

В данном подразделе разрабатываются решения, обеспечивающие снижение влияния выявленных опасных и вредных факторов на работающих. Также предлагаются мероприятия, обеспечивающие безопасность технологического процесса и эксплуатации оборудования. Возможные опасные и вредные факторы указаны в табл.5.1.

5.3.1 Производственный шум

Травление углеродных плёнок осуществлялось на вакуумной установке, одними из основных частей которой являются форвакуумный и турбомолекулярный насосы, создающие производственный шум. Воздействие шума в первую очередь влияет на органы слуха, нервную и сердечно-сосудистую системы [33]. В соответствии с ГОСТ 12.1.003-83 допустимый уровень шума при сосредоточенной умственной работе составляет 75 дБА. Зоны с уровнем звука

или эквивалентным уровнем звука выше 80 дБА обозначены знаками безопасности по ГОСТ 12.4.026. Рекомендуется использовать следующие средства коллективной защиты: акустические экраны, выгородки, объемные поглотители звука, виброизолирующие опоры; средства индивидуальной защиты: специальные наушники, вкладыши в ушную раковину, противошумные каски.

В качестве материалов для шумозащитных экранов применяют минеральную вату, композитные материалы, пластмассы, поликарбонаты, древесина, металлы, кирпичную кладку, бетон.

5.3.2 Промышленная санитария

В данной магистерской работе проводилась работа по травлению плёнок углерода в аргон – водородной плазме, продуктом взаимодействия между углеродом и водородом является – газ метан.

По ГОСТу 12.1.007-76 ССБТ существует определенная классификация по степени воздействия на организм вредные вещества подразделяют на четыре класса опасности:

- 1-й - вещества чрезвычайно опасные;
- 2-й - вещества высокоопасные;
- 3-й - вещества умеренно опасные;
- 4-й - вещества малоопасные.

Метан относится к 4 классу опасности поскольку его ПДК составляет 7000 мг/м³.

Необходимо использовать индивидуальные средства защиты (перчатки, очки, защитный рабочий халат).

5.3.3 Микроклимат

При работе установки включены охлаждающие системы и одновременно с этим процессом происходит, нагрев вакуумной камеры, что приводит к изменению микроклимата в помещении. Параметрами, характеризующими микроклимат, являются:

1. температура воздуха;
2. относительная влажность воздуха;
3. скорость движения воздуха.

Выполняемые работы относятся к Ib категории работ. К данной категории относятся работы с интенсивностью энергозатрат 121–150 ккал/ч (140–174 Вт), производимые сидя, стоя или связанные с ходьбой и сопровождающиеся некоторым физическим напряжением.

Температура наружных поверхностей технологического оборудования, ограждающих устройств, с которыми соприкасается в процессе труда человек, не превышает 45 °С.

Оптимальные величины показателей микроклимата на рабочих местах производственных помещений представлены в таблице 5.2.

Таблица 5.2 - Оптимальные величины показателей микроклимата на рабочих местах производственных помещений

| Период года | Температура воздуха, °С | Относительная влажность воздуха, % | Скорость движения воздуха, м/с |
|-------------|-------------------------|------------------------------------|--------------------------------|
| Холодный | 21-23 | 60-40 | 0,1 |
| Теплый | 22-24 | 60-40 | 0,1 |

Для создания оптимальных метеорологических условий применяется кондиционер, который поддерживает оптимальные параметры микроклимата автоматически, независимо от меняющихся условий. В холодное время года для поддержания в помещении оптимальной температуры воздуха применяется отопление.

5.3.4 Расчёт искусственной освещенности

Согласно СНиП 23-05-95 в лаборатории, где происходит периодическое наблюдение за ходом производственного процесса при постоянном нахождении людей в помещении освещенность при системе общего освещения не должна быть ниже 150 Лк.

Правильно спроектированное и выполненное освещение обеспечивает высокий уровень работоспособности, оказывает положительное психологическое действие на человека и способствует повышению производительности труда.

На рабочей поверхности должны отсутствовать резкие тени, которые создают неравномерное распределение поверхностей с различной яркостью в поле зрения, искажает размеры и формы объектов различия, в результате повышается утомляемость и снижается производительность труда.

Для защиты от слепящей яркости видимого излучения (факел плазмы в камере с катализатором) применяют защитные очки, щитки, шлемы. Очки на должны ограничивать поле зрения, должны быть легкими, не раздражать кожу, хорошо прилегать к лицу и не покрываться влагой.

Расчёт общего равномерного искусственного освещения горизонтальной рабочей поверхности выполняется методом коэффициента светового потока, учитывающим световой поток, отражённый от потолка и стен. Длина помещения $A = 5,7$ м, ширина $B = 4,3$ м, высота = $3,7$ м. Высота рабочей поверхности над полом $h_p = 1,0$ м. Согласно СНиП 23-05-95 необходимо создать освещенность не ниже 150 лк, в соответствии с разрядом зрительной работы.

Площадь помещения:

$$S = A \times B, \quad (5.1)$$

где A – длина, м; B – ширина, м.

$$S = 5,7 \times 4,3 = 24,51 \text{ м}^2 \quad (5.2)$$

Коэффициент отражения свежепобеленных стен с окнами, без штор $\rho_c = 50\%$, свежепобеленного потолка $\rho_{\Pi} = 70\%$. Коэффициент запаса,

учитывающий загрязнение светильника, для помещений с малым выделением пыли равен $K_3 = 1,5$. Коэффициент неравномерности для люминесцентных ламп $Z = 1,1$.

Выбираем лампу дневного света OSRAM DULUX L 32W/840 2G11, световой поток которой равен $\Phi_{лц} = 2900$ Лм.

Выбираем светильники ССП-158 32Вт 4000К IP65 LLT 4690612008950. Этот светильник имеет одну лампу мощностью 32 Вт, длина светильника равна 1150 мм, ширина – 60 мм.

Интегральным критерием оптимальности расположения светильников является величина λ , которая для люминесцентных светильников с защитной решёткой лежит в диапазоне 1,1–1,3. Принимаем $\lambda = 1,1$, расстояние светильников от перекрытия (свес) $h_c = 0,3$ м.

Высота светильника над рабочей поверхностью определяется по формуле:

$$h = h_n - h_p, \quad (5.3)$$

где h_n – высота светильника над полом, высота подвеса, h_p – высота рабочей поверхности над полом.

Высота светильника над полом, высота подвеса:

$$h_n = H - h_c = 3700 - 300 = 3400 \quad (5.4)$$

Высота рабочей поверхности над полом: $h_{rp} = 800$.

Расчетная высота, высота светильника над рабочей поверхностью:

$$h = h_n - h_{rp} = 3400 - 800 = 2600 = 2,6 \text{ м} \quad (5.5)$$

Расстояние между соседними светильниками или рядами определяется по формуле:

$$L = \lambda \cdot h = 1,1 \cdot 2,6 = 2,86 \text{ м} \quad (5.6)$$

Число рядов светильников в помещении:

$$Nb = \frac{B}{L} = \frac{4,3}{2,86} = 1,5 \approx 2 \quad (5.7)$$

Число светильников в ряду:

$$Na = \frac{A}{L} = \frac{5,7}{2,86} = 1,99 \approx 2 \quad (5.8)$$

Общее число светильников:

$$N = Na \cdot Nb = 2 \cdot 2 = 4 \quad (5.9)$$

Расстояние от крайних светильников или рядов до стены определяется по формуле:

$$l = \frac{L}{3} = \frac{2,86}{3} = 0,953\text{м} \quad (5.10)$$

Размещаем светильники в два ряда. На рисунке изображен план помещения и размещения светильников с люминесцентными лампами.

Однако необходимо провести дополнительные расчеты:

$$4300 = L_2 + \frac{2}{3}L_3 + 2 \cdot 1150 \quad (5.11)$$

$$L_2 = \frac{(4300 - 2300) \cdot 3}{5} = 1200 \quad (5.12)$$

$$l = \frac{L_2}{3} = \frac{1200}{3} = 400 \quad (5.13)$$

Аналогичные расчеты проводим для длины комнаты:

$$5700 = L_1 + \frac{2}{3}L_1 + 2 \cdot 60 \quad (5.14)$$

$$L = \frac{(5700 - 120) \cdot 3}{5} = 3348 \quad (5.15)$$

$$l = \frac{L_1}{3} = \frac{3348}{3} = 1116 \quad (5.16)$$

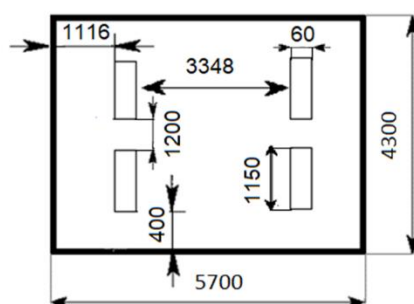


Рисунок 5.2 – Схема размещения светильников в помещении

Индекс помещения определяется по формуле:

$$i = \frac{A \cdot B}{h \cdot (A + B)} = \frac{5,7 \cdot 4,3}{2,6 \cdot (5,7 + 4,3)} = 0,94 \quad (5.17)$$

Для коэффициентов отражения берутся приблизительные значения:

= 50% и потолка = 30%. Значения коэффициента использования светового потока светильников с люминесцентными лампами примем равным 53 %.

Потребный световой поток группы люминесцентных ламп светильника определяется по формуле:

$$\Phi_{\text{л}} = \frac{E \cdot A \cdot B \cdot K_{\text{з}} \cdot Z}{N \cdot \eta} = \frac{150 \cdot 5,7 \cdot 4,3 \cdot 1,5 \cdot 1,1}{4 \cdot 0,53} = 2861,42 \text{ лм} \quad (5.18)$$

Делаем проверку выполнения условия:

$$-10\% \leq \frac{\Phi_{\text{лд}} - \Phi_{\text{п}}}{\Phi_{\text{лд}}} \cdot 100\% \leq 20\%; \quad (5.19)$$

$$\frac{\Phi_{\text{лд}} - \Phi_{\text{п}}}{\Phi_{\text{лд}}} \cdot 100\% = \frac{2900 - 2861,42}{2900} \cdot 100\% = 1,3\%. \quad (5.20)$$

Таким образом: $-10\% \leq 1,3\% \leq 20\%$, необходимый световой поток светильника не выходит за пределы требуемого диапазона.

5.3.5 Электробезопасность

Неисправность проводки установки может стать причиной поражения электрическим током. Прохождение тока может вызывать у человека раздражение и повреждение различных органов. Пороговый не отпускающий ток составляет 50 Гц (6–16 мА). Защита от воздействия электрического тока осуществляется путем проведения организационных, инженерно-технических и лечебно-профилактических мероприятий [31].

Электробезопасность должна обеспечиваться конструкцией электроустановок, техническими способами и средствами защиты. Электроустановки и их части выполнены таким образом, чтобы работающие не подвергались опасным и вредным воздействиям электрического тока и электромагнитных полей, и соответствовать требованиям электробезопасности.

Согласно [32] помещения разделяются на три класса опасности.

1. Помещение без повышенной опасности (сухое, хорошо отапливаемое, помещение с токонепроводящими полами, с температурой 18—20°, с влажностью 40—50%, $U < 1000 \text{ В}$).

2. Помещение с повышенной опасностью (где имеется один из следующих признаков: повышенная температура, влажность 70—80%,

токопроводящие полы, металлическая пыль, наличие заземления, большого к-ва оборудования, $U < 1000 \text{ В}$).

3. Помещения особо опасные, в которых имеется наличие двух признаков из второй группы или имеются в помещении едкие или ядовитые взрывоопасные вещества, $U > 1000 \text{ В}$.

Используемое помещение относится к классу с повышенной опасностью, так как в данном помещении возможно одновременное прикосновения человека к имеющей соединение с землей металлоконструкцией здания с одной стороны, и к металлическим корпусам электрооборудования, с другой стороны. Граничные значения напряжений, при повышении которых требуется выполнение защиты от косвенного прикосновения для помещений с повышенной опасностью составляет $>25 \text{ В}$ переменного тока и $>60 \text{ В}$ постоянного тока [31].

Для предотвращения поражения электрическим током следует проводить следующие мероприятия:

1. содержать оборудование в работоспособном состоянии и эксплуатировать его в соответствии с нормативно-техническими документами;
2. своевременно проводить техническое обслуживание;
3. соблюдать технику безопасности при работе с оборудованием;
4. проводить инструктаж для работников.

В качестве мероприятий по обеспечению безопасности работы с электрооборудованием могут быть использованы:

1. изоляция токоведущих частей;
2. малое напряжение в электрических цепях;
3. защитное заземление, зануление, защитное отключение;
4. применение разделяющих трансформаторов;
5. использование оболочек и блокировок для предотвращения возможности случайного прикосновения к токоведущим частям и ошибочных действий или операций;
6. защитные средства и предохранительные приспособления.

Индивидуальные защитные средства подразделяются на основные и дополнительные. К основным защитным изолирующим средствам в установке до 1000 В относятся изолирующие штанги, клещи изолирующие и электроизмерительные указатели напряжения, диэлектрические перчатки, слесарно-монтажный инструмент с изолирующими рукоятками. К 85 дополнительным изолирующим защитным средствам относятся средства, которые дополняют основные средства защиты, а также могут служить для защиты от напряжения прикосновения и шагового напряжения. Дополнительными защитными средствами в установках до 1000 В служат диэлектрические галоши, диэлектрические коврики, изолирующие подставки.

Безопасным для организма человека можно считать переменный ток силой не выше 0,05 А ток силой более 0,05 - 0,1 А опасен и может вызвать смертельный исход.

Безопасным напряжением для человека считается напряжение 42 В в нормальных условиях и 12 В в условиях повышенной опасности (сырость, высокая температура, металлические полы и др.).

Величина измерения сопротивления заземления - Ом и оно должно быть минимально низким по значению. Идеальным случаем считается, если величина будет нулевая, это означает при пропускании "вредных" электротоков какое-либо сопротивление отсутствует, что гарантирует полное поглощение их землей. Так как достигнуть идеала практически невозможно, то вся электроника и электрооборудование создаются на основе некоторых нормированных величин сопротивления заземления равно 60, 30, 15, 10, 8, 4, 2, 1 и 0,5 Ом. Исходя из ПУЭ 1.7.101, требуется не более чем 2, 4 и 8 Ом сопротивление заземления для источника тока (генератора или трансформатора).

5.3.6 Пожаровзрывобезопасность

Согласно федеральному закону от 22 июля 2008 г. N 123-ФЗ "Технический регламент о требованиях пожарной безопасности" помещения, по

взрывопожарной и пожарной опасности, подразделяются на категории А, Б, В1-В4, Г и Д, а здания – на категории А, Б, В, Г и Д. Категории помещений и зданий определяются, исходя из вида находящихся в помещениях горючих веществ и материалов, их количества и пожароопасных свойств, а также, исходя из объемно-планировочных решений помещений и характеристик проводимых в них технологических процессов.

Категории помещений по взрывопожарной и пожарной опасности делятся на: А – повышенная взрывопожароопасность; Б – взрывопожароопасность; В1-В4 – пожароопасность; Г – умеренная пожароопасность; Д – пониженная пожароопасность.

Используемое помещение относится к категории Г по пожарной и взрывопожарной опасности так, как в данном помещении используются (обращаются) негорючие вещества и горючие газы, жидкости и твердые вещества, которые сжигаются или утилизируются в качестве топлива. Также в данном помещении расположены баллоны с инертными газами (азот, аргон), которые не относятся к категории А, Б или В.

Работники допускаются к работе только после прохождения инструктажа о мерах пожарной безопасности, во всех помещениях вывешены таблички с указанием номера телефона вызова пожарной охраны и таблички с направлением пути эвакуации и план эвакуации.

В лаборатории расположены огнетушители порошковые ОП-4(з)- АВСЕ-02 (предназначен для тушения твердых, жидких и газообразных веществ и электроустановок до 1000 вольт).

Причинами возникновения пожара могут быть:

1. Нарушение правил эксплуатации электрического оборудования;
2. Курение в неустановленных местах;
3. Перегрузка электрических сетей;
4. Нарушение правил пожарной безопасности;
5. Неправильное хранение возгорающих веществ.

При работе на установке используются баллоны с аргоном и водородом. Эксплуатация баллонов связана с рядом опасных факторов. Наполненный сжатым газом баллон обладает большой энергией, и если в нем образуется отверстие, то газ истекает из него с критической скоростью.

Правила устройства и безопасной эксплуатации сосудов, находящихся под высоким давлением описаны. В целях безопасности, выполнены общие правила эксплуатации баллонов:

1. Баллоны установлены вертикально и надежно закреплены в таком положении металлическим хомутом, а также защищены от падения на них сверху каких-либо предметов.

2. Баллоны с газом, устанавливаемые в помещении, находятся от радиаторов отопления и других отопительных приборов на расстоянии не менее 1 метра и от печей и других источников тепла с открытым огнем не менее 5 метров. При невозможности выдержать необходимое расстояние, необходимо применять защитные экраны, предохраняющие баллоны от местного разогрева, располагая баллон не ближе 0.1 м от экрана. Установленные баллоны также необходимо предохранять от действия солнечных лучей [34].

3. Выпуск газов из баллона производится через редуктор, предназначенный исключительно для данного газа и окрашенный в соответствующий цвет.

5.4 Экологическая безопасность

В настоящее время одним из важных вопросов в любой сфере деятельности является вопрос экологичности. Экологичность отхода представляет собой способность отхода не оказывать отрицательного воздействия на окружающую среду за пределами допустимых значений [41].

В настоящий момент ведутся активные работы по переработке отходов, их утилизации или обеспечения повторного использования. Переработка

является процессом деятельности, направленным на изменение физического, химического состояния отхода для дальнейшего обращения с отходами.

В данной работе отходами являются продукты реакций, полученные вследствие взаимодействий аргон – водородной плазмы с углеродными покрытиями.

Утилизация продуктов реакций состоит из:

- Демонтаж металлических конструкций и сбор углеродных осадений;
- Сбор и регенерация газа (метана), полученного в ходе процесса травления.
-

5.5 Безопасность в чрезвычайных ситуациях

Чрезвычайная ситуация (ЧС) – это состояние, при котором в результате возникновения источника чрезвычайной ситуации на объекте, определенной территории или акватории нарушаются нормальные условия жизни и деятельности людей, возникает угроза их жизни и здоровью, наносится ущерб имуществу населения, народному хозяйству и окружающей природной среде.

ЧС делятся на два типа:

- ЧС природного характера;
- ЧС техногенного характера.

Виды ЧС природного характера: землетрясения; наводнения (половодье, паводок, затор, зажор, ветровой нагон, прорывы плотин); извержения вулканов; цунами; ураганы, бури, смерчи, сильный ветер; обвалы; оползни; снежные лавины; сели; пожары; грозы;

Чрезвычайные ситуации техногенного характера: транспортные аварии (катастрофы); пожары, взрывы, угроза взрывов; аварии с выбросом (угрозой выброса) химически опасных веществ; аварии с выбросом (угрозой выброса) радиоактивных веществ; аварии с выбросом (угрозой выброса) биологически опасных веществ; внезапное обрушение зданий, сооружений; аварии на электроэнергетических системах; аварии на коммунальных системах

жизнеобеспечения; аварии на очистных сооружениях; гидродинамические аварии.

Выводы по разделу «Социальная ответственность»

Данное исследование предполагает работу с высоким напряжением и взрывоопасными газами. Полученные результаты раздела «Социальная ответственность» содержат в себе основные рекомендации и указания, которые следует выполнять при разработке и исследовании процесса травления углеродных покрытий в аргон – водородной среде. Данные указания возможно в дальнейшем использовать не только при травлении в смеси Ar и H₂, но также и при комбинации других газов.

Заключение

С помощью индуктивно – связанного источника, было произведено травление углеродных плёнок в среде аргона и водорода, выявлены диапазоны рабочих параметров и определены оптимальные параметры травления.

Анализ состава атмосферы рабочего объёма вакуумной камеры показал, что начальное повышение интенсивности сигналов связано с повышением концентрации частиц, однако при снижении удельной энергии на один атом в плазме, интенсивность выходит на плато в диапазоне расхода рабочего газа 35-45 см³/мин и в дальнейшем снижается из-за нехватки энергии для диссоциации. Также, увеличение интенсивности сигналов связано с мощностью источника плазмы, при значении мощности источника равной 750 Вт, количество сигналов больше, чем при 500 Вт. Исходя из этого, оптимальным, с точки зрения спектromетрии плазмы аргон-водородной смеси можно считать диапазон по потоку аргона – 30 см³/мин, водорода – 35- 45 см³/мин. Таким образом, соотношение потоков аргона и водорода в камеру должно быть более чем 1:1.

Было получено, что скорость травления повышается с увеличением потенциала смещения на подложке. Однако при больших значениях потенциала смещения возможна генерация точечных дефектов (вакансий) на поверхности подложки, что негативно влияет на селективность травления, ввиду того, что основным механизмом в данном случае является физическое распыление, что связано с разностью энергий бомбардирующих поверхность материала.

Таким образом, было определено, что:

1) травление углеродных плёнок в плазме, формируемой индуктивно – связанным источником, в среде аргона и водорода может быть реализовано с высокой селективностью по отношению к титану (>40) и высокой скоростью (>2мкм/ч);

2) высокие значения селективности достигаются при соотношении H₂/Ar как 2,5:1, мощности источника плазмы 750 Вт и больше, и при значении напряжения отрицательного смещения на подложке (-20) В.

Данное исследование предполагает работу с высоким напряжением и взрывоопасными газами. Полученные результаты раздела «Социальная ответственность» содержат в себе основные рекомендации и указания, которые следует выполнять при разработке и исследовании процесса травления углеродных покрытий в аргон – водородной среде. Данные указания возможно в дальнейшем использовать не только при травлении в смеси Ar и H₂, но также и при комбинации других газов.

Была проведена оценка коммерческого потенциала и перспективности научного исследования. Разработка была также рассмотрена с позиции ресурсоэффективности и ресурсосбережения в сравнении с существующими на рынке конкурентами. С помощью SWOT-анализа были определены сильные и слабые стороны проекта, а также изучены рыночные возможности и угрозы. Результатом анализа стала разработка стратегия использования внутренних ресурсов для эффективного пребывания поведения во внешней среде. Помимо этого, в данном разделе разработан поэтапный план проведения научно-исследовательских работ с привязкой к исполнителю. На основе этого плана был разработан график работы, спланирован бюджет проекта.

Список используемой литературы

1. Берлин Е.В., Сейдман Л.А. Ионно-плазменные процессы в тонкопленочной технологии. — М.: Техносфера, 2010.— 528 с.
2. Берлин Е.В. Индуктивные источники высокоплотной плазмы и их технологические применения. — Москва: Техносфера, 2018.— 464 с.
3. Ferrari, A.C. Determination of bonding in diamond-like carbon by Raman spectroscopy. *Diam. Relat. Mater.* 2002, 11, 1053–1061
4. Gupta B.E. Synthesis, Structure and Properties of Nanolayered DLC/DLC Films // A Thesis. Panjab University – 2003.
5. Robertson J. Amorphous Carbon // *Advances in Physics.* – 1986. – Vol.35, №4 – P. 317-374.
6. M. Ohring, *Materials Science of Thin Films: Depositions & Structure* 2nd Edition, San Diego, USA: Academic Press, (2002).
7. Волков А. В. Исследование технологических режимов плазменного ионнохимического травления на установке “Caroline PE15” [Электронный ресурс] : электрон. учеб.-метод. пособие
8. Thomson L.A. Biocompatibility of Diamond-like Carbon Coating / L.A. Thomson, Frances C. Law, N. Rushton // *J. Biomaterials* – 1991. – Vol.12. – P. 37-40
9. Hauert R. A Review of Modified DLC Coatings for Biological Applications // *Diamond and Related Materials.* – 2003. – Vol.12. – P. 583- 589.
10. Ferrari A.C. Diamond-like Carbon for Magnetic Storage Discs // *Surface and Coatings Technology.* – 2004. – Vol.180. – P. 190-206
11. Коншина Е. А. Аморфный гидрогенизированный углерод и его применение в оптических устройствах //СПб.: НИУ ИТМО. – 2010.
12. Robertson J. Deposition Mechanisms for Promoting Sp³ Bonding in Diamondlike Carbon // *Diamond and Related Materials* – 1993. – №2. – P. 984-989.
13. Евлашин С.А. Исследование оптических и автоэмиссионных свойств углеродных наностенок: диссертация / Издательство МГУ им. Ломоносова – Москва, 2014.

14. Gupta B.E. Synthesis, structure and properties of nanolayered DLC/DLC films, 2003.
15. Ивановский Г.Ф., Петров В.И. / Ионно-плазменная обработка материалов, - М.: Радио и связь, 1986
16. Волков А. В. Исследование технологических режимов плазменного ионно-химического травления на установке “CarolinePE15” [Электронный ресурс] : электрон. учеб.-метод.
17. Nelis T., Payling R. Glow discharge optical emission spectroscopy: A practical guide – Cambridge: The royal society of chemistry. – 2003. – 224 p.
18. A. C. Ferrari and J. Robertson, Phys. Rev. B 63, 121405 (R) (2001)
19. B. Dishler, in Amorphous Hydrogenated Carbon Films, EMRS Symposia Proceedings Vol. 17 ~Les Editions de Physique, Paris, 1987, p. 189.
20. B. Bhushan Chemical, mechanical and tribological characterization of ultrathin and hard amorphous carbon coatings as thin as 3.5 nm: recent developments, Diamond and Related Materials 8 (11) (1999) 1985-2015.
21. Беляев В.С. Алмазоподобные покрытия // Нефть. Газ. Новации. – 2010. №6. С. 74-76.
22. Staryga E. Relation Between Physical Structure and Electrical Properties of Diamond-like Carbon Thin Films / E. Staryga, G.W. Bak // Diamond and Related Materials. – 2005. – Vol.14, №1. – P. 23-34.
23. Булаев С. А. Сущность импульсного лазерного напыления в вакууме как способа получения пленок нанометровых толщин //Вестник Казанского технологического университета. – 2014. – Т. 17. – №. 18.
24. Локтев Д. А. Методы нанесения износостойких покрытий и оборудование для их реализации //Д. Локтев.-декабрь. – 2004.
25. Данилин Б. С., Сырчин В. К. Магнетронные распылительные системы. М.: Радио и связь, 1982. 72 с //Герасименко Юлия Владимировна
26. Духопельников Д.В. Магнетронные распылительные системы. Устройство, принцип работы, применение // Издательство МГТУ им. Н.Э. Баумана – Москва, 2009. – С. 4-49.

27. Минайчев В.Е. Нанесение тонких плёнок в вакууме. – М: Высшая школа, 1989. – 110 с.
28. Гаркуша Ж. М. Основы физики полупроводников //М.: Высшая школа. – 1982
29. Приборы для измерения толщины покрытий «Calotest». Лабораторное оборудование [Электронный ресурс] // Компания ООО «Материалз Лаб» – URL: <http://www.materials-lab.com.ua/?oid=4312>, свободный.
30. СанПиН 2.2.2/2.4.1340-03 "Гигиенические требования к персональным электронно-вычислительным машинам и организации работы" (с изменениями на 21 июня 2016 года).
31. ГОСТ 12.1.038-82 Система стандартов безопасности труда (ССБТ). Электробезопасность. Предельно допустимые значения напряжений прикосновения и токов (с Изменением N 1). – М.: ИПК Издательство стандартов, 2001.
32. ГОСТ 12.2.003-91 Система стандартов безопасности труда (ССБТ). Оборудование производственное. Общие требования безопасности. – М.: ИПК Издательство стандартов, 2001
33. ГОСТ 12.1.029-80 Система стандартов безопасности труда (ССБТ). Средства и методы защиты от шума. Классификация. – М.: ИПК Издательство стандартов, 2001.
34. Электронный фонд правовой и нормативно-технической документации. Инструкция по охране труда при хранении и эксплуатации газовых баллонов [Электронный ресурс] – Режим доступа <http://docs.cntd.ru/document/1200039245>, свободный.
35. СанПиН 2.6.1.2523-09 «Нормы радиационной безопасности НРБ-99/2009».
36. СанПиН 2.1.5.980-00 Гигиенические требования к охране поверхностных вод.

Приложение А

(обязательное)

Gas Discharge Plasma as a Means for Etching a Solid Surface

Студент:

| Группа | ФИО | Подпись | Дата |
|--------|-------------|---------|------|
| ОДМ61 | Галин Я. С. | | |

Руководитель ВКР:

| Должность | ФИО | Ученая степень, звание | Подпись | Дата |
|-------------------------------|---------------|---------------------------|---------|------|
| доцент НОЦ Б. П. Вейнберга | Сиделёв Д. В. | к.т.н | | |

Консультант – лингвист отделения иностранных языков школы ШБИП

| Должность | ФИО | Ученая степень, звание | Подпись | Дата |
|--------------------------|-----------------------------|---------------------------|---------|------|
| Старший преподаватель | Утятина Янина Викторовна | | | |

Contents

| | |
|--|-----|
| 1 Carbon-based Coatings: Methods for their Preparation, Application..... | 122 |
| 2 Deposition Methods | 126 |
| 2.1 Ion Beam | 126 |
| 2.2 Mass Selected Ion Beam | 127 |
| 2.3 Sputtering | 128 |
| 2.4 Cathodic Arc | 129 |
| 2.5 Pulsed Laser Deposition..... | 131 |
| 3 Methods of Etching a Solid Surface..... | 132 |
| 3.1 Wet Etching | 133 |
| 3.2 Dry Etching | 134 |
| 3.2.1 Reactive Ion Etching (RIE)..... | 135 |
| 3.2.2 Inductively Coupled Plasma Etching (ICP) | 136 |
| References | 137 |

1 Carbon-based Coatings: Methods for their Preparation, Application

Diamond-like carbon (DLC) is a metastable form of amorphous carbon containing a significant fraction of sp^3 bonds. It can have a high mechanical hardness, chemical inertness, optical transparency, and it is a wide band gap semiconductor. DLC films have widespread applications as protective coatings in areas such as optical windows, magnetic storage disks, car parts, biomedical coatings and as micro-electromechanical devices (MEMs). This review will describe the preparation, characterisation, bonding, electronic and mechanical properties, the deposition mechanism and some applications of DLCs.

There have recently been very important advances in the science of carbon such as the development of the chemical vapour deposition of diamond and the discovery of C^{60} and carbon nanotubes. There have been parallel developments in the field of disordered carbons. New ways have been developed to synthesise DLC, while a range of disordered carbons with local fullerene-like order on a nanometre length scale have been discovered. The DLCs have now been characterised in great detail. The ways to grow the most diamond-like materials are now understood. Their growth mechanism is broadly understood in terms of the subplantation of incident ions.

Carbon forms a great variety of crystalline and disordered structures because it is able to exist in three hybridisations, sp^3 , sp^2 and sp^1 (Fig. 1). In the sp^3 configuration, as in diamond, a carbon atom's four valence electrons are each assigned to a tetrahedrally directed sp^3 orbital, which makes a strong σ bond to an adjacent atom. In the three-fold coordinated sp^2 configuration as in graphite, three of the four valence electrons enter trigonally directed sp^2 orbitals, which σ form bonds in a plane. The fourth electron of the sp^2 atom lies in a $p\pi$ orbital, which lies normal to the σ bonding plane. This π orbital forms a weaker π bond with a π orbital on one or more neighbouring atoms.

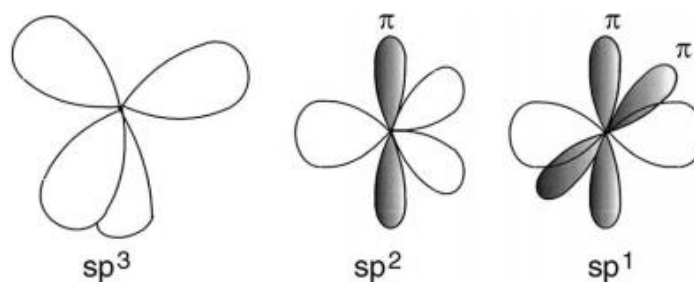


Fig. 1 The sp^1 , sp^2 , sp^3 hybridised bonding

In the sp^1 configuration, two of the four valence electrons enter σ orbitals, each forming a σ bond directed along the $\pm x$ -axis, and the other two electrons enter $p\pi$ orbitals in the y and z directions. The extreme physical properties of diamond derive from its strong, directional σ bonds.

Diamond has a wide 5.5 eV band gap, the largest bulk modulus of any solid, the highest atom density, the largest room temperature thermal conductivity, smallest thermal expansion coefficient, and largest limiting electron and hole velocities of any semiconductor. Graphite has strong intra-layer σ bonding and weak van der Waals bonding between its layers. A single graphite plane is a zero-band gap semiconductor, and in three dimensions it is an anisotropic metal.

DLC has some extreme properties similar to diamond, such as the hardness, elastic modulus and chemical inertness, but these are achieved in an isotropic disordered thin film with no grain boundaries. It is much cheaper to produce than diamond itself. This has great advantages for many applications. Typical properties of the various forms of DLC are compared to diamond and graphite in Table 1.

The sp^3 bonding of DLC confers on it many of the beneficial properties of diamond itself, such as its mechanical hardness, chemical and electrochemical inertness, and wide band gap. DLC consists not only of the amorphous carbons (a – C) but also of the hydrogenated alloys, a – C: H. It is convenient to display the compositions of the various forms of amorphous C – H alloys on a ternary phase diagram as in Fig. 2, as first used by Jacob and Moller. There are many a – Cs with disordered graphitic ordering, such as soot, chars, glassy carbon, and evaporated a-C.

These lie in the lower left-hand corner. The two hydrocarbon polymers polyethylene $(CH_2)_n$ and polyacetylene $(CH)_n$ define the limits of a triangle in the right hand corner beyond which interconnecting C-C networks cannot form, and only molecules form. Deposition methods have been developed to produce a-Cs with increasing degrees of sp^3 bonding. Sputtering can extend from sp^2 bonding some way towards sp^3 bonding. If the fraction of sp^3 bonding reaches a high degree, McKenzie [1] suggested that the aC is denoted as tetrahedral amorphous carbon (ta-C), to distinguish it from sp^2 a-C. A range of deposition methods, such as plasma enhanced chemical vapour deposition (PECVD) [3], is able to reach into the interior of the triangle. This produces a-C: H. Although this is diamond-like, it is seen from Fig. 2 that the content of sp^3 bonding is actually not so large, and its hydrogen content is rather large. Thus, a more sp^3 bonded material with less hydrogen which can be produced by high plasma density PECVD reactors is called hydrogenated tetrahedral amorphous carbon (ta-C:H) by Weiler et al [2].

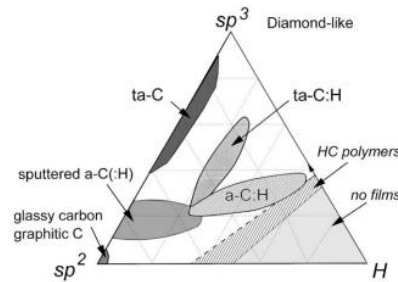


Fig. 2 Ternary phase diagram of bonding in amorphous carbon hydrogen alloys

Table 1

Comparison of major properties of amorphous carbons with those of reference materials diamond, graphite, C_{60} and polyethylene.

| | sp^3 (%) | H (%) | Density ($g\ cm^{-3}$) | Gap (eV) | Hardness (GPa) | Reference |
|--------------|------------|-------|--------------------------|----------|----------------|-----------|
| Diamond | 100 | 0 | 3.515 | 55 | 100 | [12] |
| Graphite | 0 | 0 | 2.267 | 0 | | [15] |
| C_{60} | 0 | 0 | | 1.6 | | [14] |
| Glassy C | 0 | 0 | 1.3–1.55 | 0.01 | 3 | [3] |
| Evaporated C | 0 | 0 | 1.9 | 0.4–0.7 | 3 | [3] |
| Sputtered C | 5 | 0 | 2.2 | 0.5 | | [18] |
| ta-C | 80–88 | 0 | 3.1 | 2.5 | 80 | [6,17,18] |
| a-C:H hard | 40 | 30–40 | 1.6–2.2 | 1.1–1.7 | 10–20 | [4] |
| a-C:H soft | 60 | 40–50 | 1.2–1.6 | 1.7–4 | <10 | [4] |
| ta-C:H | 70 | 30 | 2.4 | 2.0–2.5 | 50 | [22] |
| Polyethylene | 100 | 67 | 0.92 | 6 | 0.01 | [20] |

Hydrogenated amorphous carbons classified into four classes:

(1) a-C:H films with the highest H content (40–50%). These films can have up to ~60% sp^3 . However, most of the sp^3 bonds are hydrogen terminated, and this material is soft and with low density. We call these films polymer-like a-C:H (PLCH). Their band gap is above 2 eV and can reach 4 eV.

(2) a-C:H films with intermediate H content (20–40%). Even if these films have a lower overall sp^3 content, they have more C – C sp^3 bonds compared to PLCH. Thus, they have better mechanical properties. Their optical gap is between 1 and 2 eV. We call these films diamond-like a-C:H (DLCH).

(3) Hydrogenated tetrahedral amorphous carbon films (taC:H). ta – C:H films are a class of DLCH for which the C – C sp^3 content can be increased whilst keeping a fixed H content. Thus, most films defined in literature as ta-C:H are just DLCHs. However, the ta – C:H films with the highest sp^3 content (~70%) and ~25 at.% H content do really fall in a different category as also shown by their Raman spectra, their higher density (up to 2.4 g/cm³) and Young's Modulus (up to 300 GPa). The optical gap can reach 2.3 eV.

(4) a – C:H with low H content (less than 20%). They have a high sp^2 content and sp^2 clustering. The gap is under 1 eV. We call these films graphite-like a – C:H (GLCH).

2 Deposition Methods

2.1 Ion Beam

The first DLCs were prepared as thin films by Aisenberg and Chabot [12] using ion beam deposition. It is possible to produce DLCs by a wide range of deposition methods [1,4]. The methods can be categorised as to whether they are most suitable for laboratory studies or industrial production. The common feature of these methods is that the DLC film is condensed from a beam containing medium energy (~ 100 eV) carbon or hydrocarbon ions. It is the impact of these ions on the growing film that induces the sp^3 bonding – a physical process. This contrasts with the chemical vapour deposition (CVD) of diamond, where a chemical process stabilises its sp^3 bonding [5]. The best deposition process for DLC will provide a carbon ion flux at about 100 eV per carbon atom, with a narrow energy distribution, a single energetic species and a minimum number of nonenergetic (generally neutral) species [6].

Various deposition systems are shown schematically in Fig. 3. In a typical ion beam deposition system, carbon ions are produced by the plasma sputtering of a graphite cathode in an ion source. Alternatively, as in the Kaufman source, a hydrocarbon gas such as methane is ionized in a plasma. An ion beam is then extracted through a grid from the plasma source by a bias voltage. The carbon ions or hydrocarbon ions are then accelerated to form the ion beam in the high vacuum deposition chamber. In both cases, the ion source runs at a finite pressure, so that the beam also contains a large flux of unionised neutral species. This can reduce the flux ratio of ions to neutrals to as low as 2 – 10%. Ion beam sources tend to run best at higher ion energies of 100–1000 eV.

A variant of ion beam deposition is the cascade arc source [7]. Here, a high-pressure source produces an intense plasma, which then expands supersonically into a high vacuum, giving rise to large fluxes of ions and radicals.

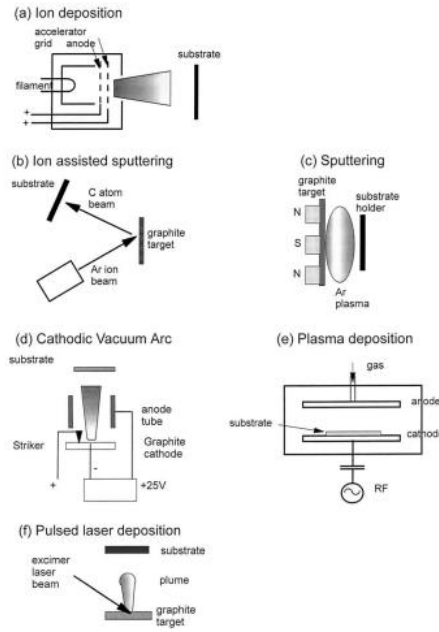


Fig. 3. Schematics of various deposition systems for DLC

2.2 Mass Selected Ion Beam

For laboratory work, it is desirable to have a controlled deposition from a single ion species at a well-defined ion energy. This is achieved by mass selected ion beam deposition (MSIB). Carbon ions are produced in an ion source from a graphite target, such that the spread of ion energies is small, 1 – 10 V. The ions are then accelerated to 5 – 40 kV and passed through a magnetic filter. This filters out any neutrals and selects ions with an e/m ratio of the C^+ ion. The ion beam will diverge because of its Coulombic repulsion. The ions are then decelerated to the desired ion energy by electrostatic lens, and the beam is focused onto the substrate in a vacuum of order 10^{-8} Torr to produce a ta-C film. The advantages of MSIB are that it gives a controllable deposition species and energy, a filtering out of non-energetic species, and the ability to dope by switching the ion species. The disadvantage is the low deposition rate of order $0.001 \text{ Angstrom}^{-1}$ and the high cost and size of the apparatus. The MSIB method and its use have been reviewed by Lifshitz [8], Hofsass and Ronning [13] and Hirvonen et al. [14].

2.3 Sputtering

The most common industrial process for the deposition of DLC is sputtering. The most common form uses the dc or rf sputtering of a graphite electrode by an Ar plasma. Because of the low sputter yield of graphite, magnetron sputtering is often used to increase the deposition rate. Magnets are placed behind the target to cause the electrons to spiral and increase their path length, and thus to increase the degree of ionisation of the plasma. As ion bombardment helps the formation sp^3 of bonding, the magnetic field can be configured to pass across to the substrate, so this causes the Ar ions to also bombard the substrate, to give an 'unbalanced magnetron'. A dc bias can be applied to the substrate to vary the ion energy. The a-C:H can be produced by reactive sputtering, by using a plasma of Ar and hydrogen or methane, and a-CN_x can be produced using an argon – nitrogen plasma.

Alternatively, in ion beam sputtering, a beam of Ar ions can be used to sputter from the graphite target to create the carbon flux. A second Ar ion beam can be used to bombard the growing film, to densify the film or encourage sp^3 bonding. This is called ion beam assisted deposition (IBAD) or ion plating.

Sputtering is preferred for industrial applications because of its versatility, its widespread use to sputter many materials, and its ease of scale up. Also, the deposition conditions can be controlled by the plasma power and gas pressure but they are reasonably independent of the substrate geometry or condition. A disadvantage of sputtering is, like ion beam deposition, that it can have a relatively low ratio of energetic ions to neutral species, so that it does not produce the hardest DLC films. However, sputtering methods with a very high fraction of ions have been developed by Schwan et al. [15] and Cuomo et al. [16] to produce a-C with a relatively large sp^3 fraction, but this is at the expense of a low growth rate.

2.4 Cathodic Arc

An unusual method for laboratory and industrial use is the cathodic arc. An arc is initiated in a high vacuum by touching the graphite cathode with a small carbon striker electrode and withdrawing the striker. This produces an energetic plasma with a high ion density of up to 10^{13} cm^3 . A typical cathodic arc system is shown in Fig. 3. The power supply is a low voltage, high current supply. The cathodic arc is also widely used to deposit hard coating materials, such as tin by the reactive deposition of Ti in a nitrogen atmosphere.

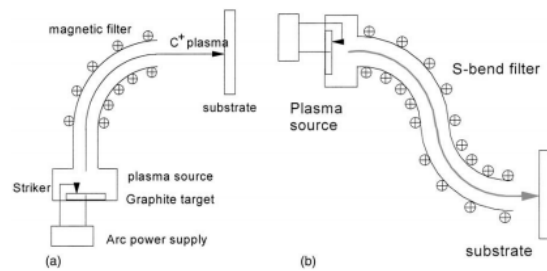


Fig. 4. Schematic of a (a) single bend and (b) S-bend FCVA.

The cathode spot is small, $1 - 10 \mu\text{m}$ and it carries a very high current density of $10^6 - 10^8 \text{ A cm}^2$. The spot is formed by an explosive emission process. This creates particulates as well as the desired plasma. The particulates can be filtered by passing the plasma along a toroidal magnetic filter duct [9], as shown in Fig. 4. This is known as filtered cathodic vacuum arc (FCVA). The toroidal currents produce a magnetic field of about 0.1 T along the axis of the filter. The electrons of the plasma spiral around the magnetic field lines and so they follow them along the filter axis. This motion produces an electrostatic field, which causes the positive ions to follow the electrons around the filter. This produces an amipolar transport of the plasma around the filter. The particulates cannot follow the field and they hit the walls and baffles on the walls. Alternatively, in the open filter system used by Brown and Anders et al., the particulates pass between the coils out of the filter zone into the chamber. The neutrals also hit the walls, so the filter raises the plasma ionisation from about 30% to nearly 100% at the filter exit. The plasma beam is condensed onto a substrate to produce the ta-C. At the cathode end, the plasma has a mean ion energy of $10 - 30 \text{ eV}$, depending on the arc current and it has a Gaussian distribution of ion energies [10] as shown in

Fig. 5. A dc or rf self-bias voltage applied to the substrate is used to increase the incident ion energy [11]. The FCVA should be operated at a background pressure of $\sim 10^{-8}$ Torr, but this may rise to 10^{-5} when the plasma is running.

The advantages of the FCVA are that it produces a highly ionised plasma with an energetic species, a fairly narrow ion energy distribution, and high growth rates of 1 nm s^{-1} for a low capital cost. It is used on an industrial scale. Unlike ion beam deposition, the depositing beam in FCVA is a neutral plasma beam so that it can deposit onto insulating substrates. The disadvantages are that the filtering is not sufficient for some applications, and that the cathode spot is unstable.

The particulates are generally submicron-size particles. These can still pass through the filter section by bouncing off the walls. The filtering can be improved by a factor of 100, by adding baffles along the filter section, and by including a second bend to give a double bend or 'S – bend' filter, as shown in Fig. 4b.

The arc can run continuously or in a pulsed mode. The pulsed mode occurs by using a capacitor bank to strike the arc, or by laser initiation. The arc current can be passed through the filter coils. The pulsed mode allows better filtering, because the ions tend to be entrained in the plasma beam during the pulse, but fall out of the plasma when the beam stops [7].

On metals, the arc produces a molten spot of higher resistivity, so the arc tends to move sideways to another spot of lower resistivity. The arc spot therefore moves around the surface, giving a continuously running arc, which consumes the cathode evenly. On semiconductors or materials like carbon, the arc spot has lower resistivity than its surroundings, so the arc spot tries to stay in the same place, and erodes deeper at the same place. The cathode stability can be improved by restriking the arc or by using a magnetic field in the cathode region to steer the cathode spot around the cathode surface.

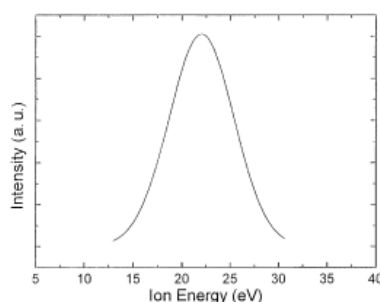


Fig. 5. Ion energy distribution from FCVA

Ions are lost to the wall during transport through the filter duct. This can be minimised by giving the filter section a positive bias of about +20 V. It is often useful to allow the excess electron current from the cathode to flow to an anode at the entrance of the filter duct. It is possible to deposit uniform films over areas of 10 cm or more by using a magnetic bottle configuration to diverge the beam after the filter duct or by scanning the beam by current coils. The deposition rate is proportional to the electron current from the cathode.

In the arc, the main current is an electron current to the anode, known as the arc current. The ion current away from the cathode is proportional to the arc current and about 10 – 100 times less. The mean ion energy rises slightly with arc current.

2.5 Pulsed Laser Deposition

Pulsed excimer lasers such as ArF give very short, intense energy pulses, which can be used to vaporise materials as an intense plasma. The plasma then expands towards the substrate. The kinetic energy of this expansion gives an ion energy analogous to the ion energy of MSIB or the cathodic arc. The mean ion energy is proportional to the laser fluence concentrated at the target spot. It has been measured as a function of laser fluence. In this way pulsed laser deposition (PLD) produces ta-C films similar to those from the MSIB and FCVA methods. The dependence of properties on ion energy is similar.

3 Methods of Etching a Solid Surface

Etching techniques are commonly used in the fabrication processes of semiconductor devices to remove selected layers for the purposes of pattern transfer, wafer planarization, isolation and cleaning.

There are two fundamental groups of etching: wet etching (liquid-based etchants) and dry etching (plasma-based etchants). Wet etching removes the materials by immersing the wafers in a chemical solution that reacts with selected films to form soluble by-products. It is easily implemented and cost-efficient, and it etches quickly. Sometimes, high selectivity can also be achieved. However, it is difficult to control, prone to high defect levels on wafers, inadequate for defining feature sizes that are smaller than $1\mu\text{m}$, and produces chemical waste. Due to these properties, wet etching is usually used for some noncritical processes such as wet cleaning (removal of SiO_2 layer to obtain clean Si wafers). Dry etching, also called plasma etching, sputters or dissolves the materials using reactive ions in a gas phase. It utilizes plasma instead of liquid etchants to remove the materials, which is more precise, controllable and repeatable compared to wet etching, but a more expensive vacuum system is required. For instance, plasmas are easier to start and stop, and less sensitive to temperature; moreover, they are capable of defining feature sizes smaller than 100nm. In this module, you will perform both wet and dry etching experiments.

Etch rate is defined as etched depth per unit time. Common desired etch rates are between 100 to 1000 angstroms per minute. If the etch rate is too high, the process will be difficult to control. However, in some cases, high etch rates are preferable for deep hole etching (i.e., anisotropic etch process which creates deep penetrating holes and trenches in wafers) or substrate removal.

Uniformity is the percentage variation of the etch rates across a wafer.

Selectivity is the ratio of the etch rates of one material over the other. For example, the selectivity is ratio of the etch rate of the layer being etched to the etch rate of the mask or the layer under the layer being etched. Etching with high selectivity is supposed to remove the selected layer entirely without harming the substrate and mask.

For example, KOH etches polysilicon over oxide, with selectivity 1000 to 1, which shows that the polysilicon can etch 1000 times faster than oxide [1].

3.1 Wet Etching

Wet etching is a purely chemical process that removes materials from a wafer using liquidphase etchants.

Most wet etchants consist of an oxidizing agent, an agent for dissolving the oxides, and a solvent, such as water. The typical materials of the oxidizing agent are H_2O_2 , Br_2 , $\text{AgNO}_3/\text{CrO}_3$, HNO_3 , and NaOCl . The agents for dissolving the oxides can be an acid or base which can dissolve the oxidized layer, for example, NH_4OH , NaOH , H_2SO_4 , HCl , HF , and H_3PO_4 . The solvent is usually water or CH_3COOH to transport reactants and products.

A wet etching process involves multiple chemical and physical processes, which are described in Figure 6. First, the etchant species is transported to the surface of the wafer. This process typically includes diffusion of the etchant towards the surface and adsorption of the etchant at active sites on the surface. Second, a chemical reaction between the etchant and the exposed surface happens; this then produces soluble by-products. Finally, the products of the reaction will desorb and move away from the surface by diffusion. The slowest step of these processes is called rate-limiting step, which can determine the etch rate. If the thickness of the diffusion boundary layer is very small, the etching process will be determined by the chemical reaction step and become reaction-rate-limited. Diffusion-limited etching often occurs in viscous solutions which consist of high concentrations of the agent for dissolving the oxides and low concentrations of the oxidizing agent. The etch rate at the mask edge will be enhanced as the concentration of the etchant at the edge is higher, especially for diffusion-limited etching.

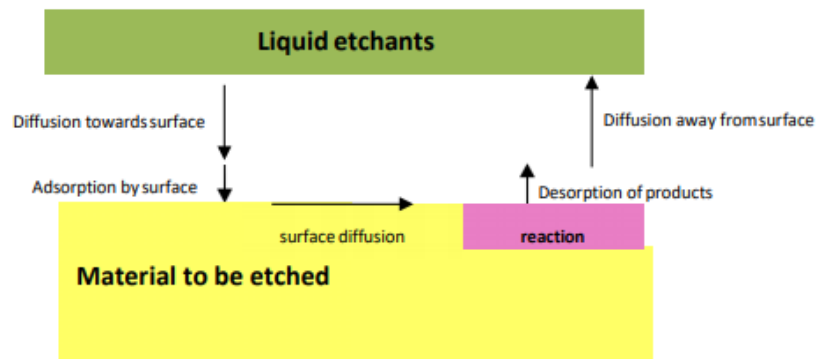


Fig. 6 Wet etching mechanisms

3.2 Dry Etching

Dry etching is one of the most widely used processes in manufacturing since it is easier to control, is capable of defining feature sizes smaller than 100 nm, and produces highly anisotropic etching. It may remove the materials by chemical reactions (using chemical reactive gases or plasma), by purely physical methods (e.g., sputtering and ion beam-induced etching), or with a combination of both chemical reaction and physical bombardment (e.g., reactive ion etching).

Plasma is a partially ionized gas composed of equal numbers of positive and negative charges, as well as some neutral molecules. Plasma can be generated by applying a strong radio frequency (RF) electromagnetic field to a gas, which breaks down gas molecules and generates ions, free radicals, electrons, photons and reaction by-products such as ozone. Since these reactive species have high energy, they create highly active and lowtemperature plasma which can etch materials precisely and efficiently. Some practical applications of plasma include clearing surface films and sputtering materials into a surface.

The mechanism of dry etching is very similar to the wet etching mechanism. First, a feed gas is introduced into the chamber, where it is broken down into chemically reactive species to form plasma. Reactive species diffuse to the surface to be etched and are then adsorbed on this surface. Once the reactive species reach the surface, they move around on the surface (this process is called surface diffusion) until they react with the exposed film. Afterwards, products of the reaction will desorb from the surface

and diffuse away through the gas steam. In some cases, the sample chuck temperature is intentionally elevated to increase volatility of the products.

3.2.1 Reactive Ion Etching (RIE)

RIE combines physical processes with chemical reactions. It uses a chemically reactive plasma generated under a low pressure (10-100 mTorr) to consume the materials deposited on wafers, along with non-reactive ionic bombardment which can make certain areas on the wafer accessible for chemical reactions. In the RIE system, the chuck holding wafer is grounded and another electrode is connected to the RF power source (Figure 7). Generally, the frequency is 13.56 MHz. Since electrons are more mobile compared to positive ions due to their lighter weight, they travel longer distances and collide more frequently with the electrodes and chamber walls and are consequently removed from the plasma. This process leaves the plasma positively charged. Nevertheless, plasma tends to remain neutral charged; thus, a DC electric field is formed [7]. The region of surfaces in the chamber and electrodes, shown in Figure 7, is called “dark sheath”. Besides the chemical reaction between the plasma and the target material, the positive ions can be accelerated across the dark sheath by electrical field and strike the target material. This process is the physical bombardment which can also assist the etching process. In addition, in contrast to the wet chemical etching, RIE has a higher probability to move the etchants in the direction of the electric field and produces more anisotropic etch profiles.

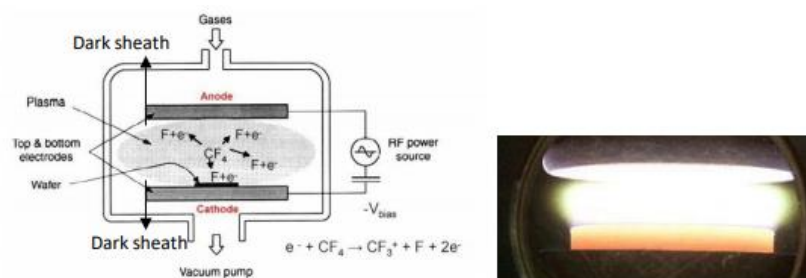


Figure 7. RIE system and dark sheath area with plasma [8]

3.2.1 Inductively Coupled Plasma Etching (ICP)

The ICP employs radio frequency generated by the electromagnetic induction coil to create plasma of ionized atoms and radicals capable of etching various semiconductor materials. As to the geometry and operation of ICP, the induction coil of the ICP is wrapped two or three times around the torch (a concentric quartz structure shown in Fig. 8) and has water flowing through it for cooling purposes. In order for the RF power to travel along the surface of the coil with minimum resistance, all ICPs have a capacitor bank, which is continuously tuned to match the plasma's inductance. The RF power supply maintains the plasma and the Tesla coil is used to ignite the plasma through the generation of electrons and ions, which couple with the magnetic field. Very high plasma densities can be achieved by ICP and the etch profiles tend to be more isotropic than RIE.

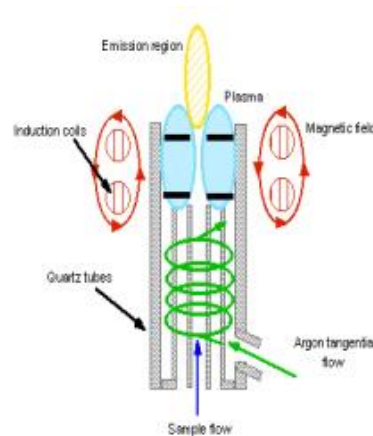


Fig .8 ICP Torch and ICP Schematic [9]

Currently, the combination of typical RIE (parallel plate) and inductively coupled plasma RIE is possible. In this system, the ICP is employed as a high-density source of ions which increases the etch rate, whereas a separate RF bias is applied to the substrate to create directional electric fields near the substrate to achieve more anisotropic profiles. However, it can also be run in RIE mode for certain low etch rate applications and control over selectivity and damages.

References

1. D.R. McKenzie, Rep. Prog. Phys. 59 (1996) 1611.
2. M. Weiler, S. Sattel, K. Jung, H. Ehrhardt, V.S. Veerasamy, J. Robertson, Appl. Phys. Lett. 64 (1994) 2797.
3. Ferrari, A.C. Determination of bonding in diamond-like carbon by Raman spectroscopy. Diam. Relat. Mater. 2002, 11, 1053–1061
4. Gupta B.E. Synthesis, Structure and Properties of Nanolayered DLC/DLC Films // A Thesis. Panjab University – 2003.
5. Robertson J. Amorphous Carbon // Advances in Physics. – 1986. – Vol.35, №4 – P. 317-374.
6. M. Ohring, Materials Science of Thin Films: Depositions & Structure 2nd Edition, San Diego, USA: Academic Press, (2002).
7. B. Druz, R. Ostan, S. Distefano, A. Hayes, V. Kanarov, V. Polyakov, Diamond Rel. Mater. 7 (1998) 965.
8. Y. Lifshitz, Diamond Rel. Mater. 5 (1996) 388.
9. Hauert R. A Review of Modified DLC Coatings for Biological Applications // Diamond and Related Materials. – 2003. – Vol.12. – P. 583- 589.
10. Ferrari A.C. Diamond-like Carbon for Magnetic Storage Discs // Surface and Coatings Technology. – 2004. – Vol.180. – P. 190-206
11. Gupta B.E. Synthesis, structure and properties of nanolayered DLC/DLC films, 2003.
12. S. Aisenberg, R. Chabot, J. Appl. Phys. 42 (1971) 2953.
13. H. Hofsass, C. Ronning, Beam Processing of Advanced Materials, ASME, Cleveland, 1995.
14. J.P. Hirvonen, R. Lappalainen, J. Koskinen, A. Antilla, Mater. Sci. Forum 52 (1990) 197.
15. J. Schwan, S. Ulrich, H. Roth, H. Ehrhardt, S.R.P. Silva, J. Robertson, R. Samlenski, J. Appl. Phys. 79 (1996) 1416.